

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA-MIEDZESZYN

PROBLEMY

BIBLIOTEKA
Instytutu Łączności

ŁĄCZNOŚCI

90

1973

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

BIBLIOTEKA
Instytutu Łączności

Nr _____

PROBLEMY ŁĄCZNOŚCI

ROK 13

WARSZAWA 1973

NR 90

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Redaktor Naczelny - mgr inż. Jerzy Rutkowski

Redaktorzy działów:

mgr inż. Władysław Cetner, mgr inż. Adam Moniuszko,

mgr inż. Józef Możejko

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branzowy Ośrodek

Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

NA PRAWACH REKOPISU

Redaktor: J. Borkowska

Montaż tekstu: B. Drabik

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności

Format B5. Nakład 590. Wpłynęło do

Działu Wydawniczego 24.04.1972 r.

Druk ukończono w styczniu 1973 r.

PROBLEMY ŁĄCZNOŚCI

Opracowania tłumaczeń

LINIE FALOWODOWE

SPIS TREŚCI

Str.

1. Peacock J.M.: Waveguide design and installation for long-haul trunks, p. 95-100.
Projektowanie i instalowanie linii falowodowych dla połączeń dalekosiężnych 1
2. Bendayan J., Comte G.: Circular electric waveguides for the long distance transmission of many telephone or television channels, p. 51-55.
Falowody cylindryczne do transmisji na duże odległości wielu sygnałów telefonicznych lub telewizyjnych 11
3. Bourgeat L.: Account of the researches in France on trunk telecommunications by guided waves and prospects in the future, p. 281-284.
Sprawozdanie z prowadzonych we Francji badań w zakresie linii falowodowych i perspektywy na przyszłość 15

4. Herlent Y., Boutelant P., Garnier C.: The experimental link Meudon-Saint Amand, p. 285-290.
Linia doświadczalna Meudon - Saint-Amand 21
5. Ritchie W.K., Rose D.J., Rose L.: Mechanical design and assessment of TE_{01} mode circular waveguide, p. 101-106.
Projektowanie mechaniczne i parametry falowodów cylindrycznych przystosowanych do przesyłania fali modu TE_{01} 28
6. Morris D.W.: Planning and installation aspects of a millimetric waveguide system field trial, p.154-158.
Aspekty planowania i instalowania doświadczalnego systemu linii falowodowej na fale milimetrowe 35
7. White R.W.: Millimetric waveguide system research in the British Post Office, p. 319-323.
Prowadzone przez Poczte Brytyjską badania systemu łączności falowodowej na fale milimetrowe 45
8. Traeger A., Lorek W.: Investigations concerning a waveguide system, p. 291-302.
Badania systemów linii falowodowych 55
9. Dmitrachenko W.M. i inni: Design and construction principles of the trial 14 km waveguide communications by guided waves, p. 355-356.
Zasady projektowania i budowy doświadczalnej linii falowodowej o długości 14 km 62

10. Sushi N., Shimba M.: Transmission characteristics of buried millimeter waveguide lines, p. 27-32.

Właściwości transmisyjne zakopanej w ziemi linii
falowodowej na fale milimetrowe



LINIE FALOWODOWE

Opracował J. Zygierewicz na podstawie referatów
wygłoszonych na "Conference on trunk telecommunica-
tions by guided waves" Londyn 29.IX-2.X.1970 r. i opu-
blikowanych w IEE Conference Publication 1970 nr 71.

1. PROJEKTOWANIE I INSTALOWANIE LINII FALOWODOWYCH DLA POŁĄCZEŃ DALEKOSIĘŻNYCH

Możliwość wykorzystania do dalekosiężnych połączeń linii falowodowych pracujących na falach milimetrowych jest sprawą bardzo obiecującą. Badania w tym zakresie prowadzone są w laboratorium Bella już od wielu lat. Próby w terenie na większą skalę przewidywane są w 1974 roku, a oddanie linii falowodowych do eksploatacji pod koniec obecnego dziesięciolecia, kiedy to zajdzie konieczność stosowania linii o bardzo dużych przepustowościach w związku z gwałtownie rosnącym zapotrzebowaniem na łącza. Poniżej zostaną przedstawione najważniejsze kierunki prac w zakresie przygotowań do budowy linii falowodowych.

1.1. Falowody

Przewiduje się stosowanie 5-10 metrowych odcinków falowodów cylindrycznych o średnicy 51 mm /2 cale/ w postaci falowodów me-

talowych pokrytych warstwą dielektryku, przedzielonych odcinkami o tej samej długości falowodów spiralnych w celu stłumienia fal niepożądanych modów. Struktura tych falowodów pokazana jest na rys. 1^{x/}. Prowadzone obecnie prace zmierzają do:

a/ bliższego poznania zagadnienia konwersji modów i wynikających stąd wymagań na dokładność budowy linii falowodowej;

b/ opracowania technologii produkcji falowodów o wymaganych tolerancjach oraz stabilności pracy przy ich umieszczeniu pod powierzchnią ziemi;

c/ opracowania metod produkcji bardziej prostoliniowych, jednorodnych rur o większej przewodności powierzchni;

d/ przygotowania zaplecza do podjęcia produkcji na dużą skalę.

Równolegle podejmuje się badania w zakresie różnych struktur falowodowych, możliwości zakrzywiania toru falowodu przy stosunkowo małych stratach, kompensacji wpływów temperaturowych itp.

1.2. Złącza

Połączenia odcinków falowodów są jednym z najbardziej krytycznych elementów w budowie linii falowodowych. Na jeden odcinek przekaźnikowy linii będzie przypadało kilka tysięcy złączy, wpływając na warunki propagacji fal oraz niezawodność i koszty instalacji systemu. Ze względu na ciągłość elektryczną i mechaniczną linii w punktach połączenia proponuje się ustalić następujące wymagania na złącza:

^{x/} Wszystkie rysunki są zamieszczone na końcu artykułu.

przesunięcie osiowe	25 mikronów
odchylenie kątowe	0,5 miliradianów
czas realizacji w trakcie budowy	2,5 minuty
okres niezawodnej pracy	40 lat.

Rozpatrzono wiele rozwiązań mogących ewentualnie spełnić te wymagania. Najbardziej właściwe wydaje się rozwiązanie pokazane na rys. 2, w którym pierścień dociskowy zapewnia centrowanie promieniowe oraz sztywność wzdłużną połączeń. Wymaga ono jednak jeszcze dalszych badań praktycznych.

1.3. Metody pomiarów

Dotyczy to opracowania zarówno metod jak i przyrządów pomiarowych, umożliwiających pomiary transmisyjne linii falowodowych w zakresie częstotliwości 40 - 110 GHz i to zarówno w trakcie produkcji odcinków falowodów, jak i ich instalowania i eksploatacji linii falowodowych. Za najważniejsze rodzaje pomiarów należy uznać pomiary: tłumienności, zniekształceń na skutek opóźnień czasowych, niedokładności geometrycznych w trakcie produkcji i instalowania falowodów, wykrywanie niepożądanych modów fal. Pomiary te powinny być wykonywane głównie przy zastosowaniu techniki impulsowej.

W trakcie prób laboratoryjnych przebadano również sprawę zależności tłumienności transmisji od niedokładności geometrycznych falowodu, co pozwala na pomiary nawet krótkich odcinków falowodu, rzędu 5 m. Można tą metodą mierzyć odchylenia od cylindryczności z dokładnością 2,5 mikrona, co ma bardzo duże znaczenie z punktu widzenia procesów produkcyjnych.

1.4. Parametry falowodów

Sprawą istotną i jeszcze nie w pełni przebadaną jest to, w jakim stopniu przy masowej produkcji można zapewnić utrzymanie teoretycznie określonej tłumienności falowodu.

Podobnie nie jest znana odpowiedź co do optymalnej odległości między stacjami przekaźnikowymi. Przewidywane krzywe przebiegu tłumienności falowodów przedstawiono na rys. 3. Oparte są one na syntetycznych pomiarach elektrycznych i mechanicznych przeprowadzanych w laboratorium oraz na pewnych założeniach co do możliwości spełnienia wymaganych jednorodności wykonania odcinków w trakcie procesów produkcyjnych. Dalsze badania pozwolą na określenie, w jakim stopniu założenia te są słuszne.

1.5. Metody instalowania

Sprawa opracowania ekonomicznych metod budowy linii falowodowej jest niezmiernie istotna z dwóch powodów, a mianowicie:

- 1/ prawidłowe działanie linii jest nierozłącznie związane z jej parametrami geometrycznymi i strukturalną stabilnością w czasie;
- 2/ koszty konstrukcji linii reprezentują ponad połowę kosztów samych falowodów. Przy projektowaniu należy przewidzieć wszystkie trudności, jakie będzie można napotkać na trasie w trakcie instalowania i należy o tym odpowiednio poinstruować wykonawców.

Najważniejszą przy tym sprawą są niewątpliwie zakrzywienia toru falowodu w płaszczyźnie poziomej i pionowej, w związku z czym odstęp między stacjami przekaźnikowymi nie może być prostą funkcją długości linii, jak w przypadku linii kablowych.

Sprawą wymagającą dalszych badań jest również stabilność systemu w ciągu długiego okresu czasu. Tablica 1 przedstawia procesy starzenia się dwóch instalacji falowodowych zakopanych w ziemi w 1963 roku:

Tablica 1

	Tłumienie początkowe wrzesień 1963	Tłumienie końcowe luty 1967
Zakopany bezpośrednio w ziemi	2,75 dB/mil	3,08 dB/mil
Umieszczony w rurze ochronnej	2,15 dB/mil	2,15 dB/mil

częstotliwość 85 GHz

długość 1/4 mili

Z tablicy wynika, że falowód zakopany bezpośrednio w ziemi ma większą tłumienność początkową i bardziej zmieniającą się w czasie w porównaniu do tego samego typu falowodu umieszczonego na wspornikach wewnątrz ochronnej rury. W związku z tym proponuje się instalowanie linii falowodowej w sposób pokazany na rys. 4.

Jedną ze spraw do rozwiązania jest usunięcie wpływu nieregularności podłoża oraz izolowanie falowodu od wpływu czynników zmiennych poniżej warstwy ziemi, w której umieszczono falowód. Prowadzone obecnie prace powinny doprowadzić do wyboru optymalnej metody instalowania linii falowodowej pod powierzchnią ziemi.

W odniesieniu do metod konstrukcji prostolinijnych odcinków falowodów proponuje się wykorzystać technikę laserową; w oparciu

o doświadczenia przy instalacji rurociągów naftowych wydaje się stosunkowo łatwo zapewnić kontrolę z dokładnością ± 1 cm. Nie wyczerpuje to jednak zagadnienia. Trzeba wziąć również pod uwagę przekraczanie rzek, układanie linii na bagnach, niestabilnych gruntach, podłożach skalnych itp.

Nie została jeszcze rozstrzygnięta sprawa, czy umieszczać odcinki falowodu w odcinkach rur ochronnych na terenie fabryki i łączyć je jeden za drugim w trakcie instalowania, czy też zakopywać w ziemi dłuższe odcinki rur i dopiero wówczas umieszczać w nich falowód, jak to zrobiono w Niemczech. Rozwiązania wymaga również problem zmian temperaturowych. Prawdopodobnie zajdzie potrzeba rozmieszczenia na trasie złączy wyrównujących te zmiany, o ile nie zostanie wymyślona odpowiednia metoda związania falowodu z podłożem dla uniknięcia wpływu zmian odległości między wspornikami. Ścisłejsze związanie falowodu z podłożem jest znów niepożądane ze względu na inne niejednostajności, w związku z czym musi być osiągnięty odpowiedni kompromis.

1.6. Metody utrzymania

Należy oczekiwać znacznie większej niezawodności linii falowodowych w porównaniu do szerokopasmowych linii kablowych z następujących powodów: a/ mniejszej fizycznej wrażliwości ośrodka transmisyjnego; b/ większej odległości między stacjami przekątnymi i w związku z tym mniejszej liczby elementów elektronicznych na kilometr linii. Ponieważ koszty i kłopoty związane z uszkodzeniem toru w przypadku linii o dużej przepustowości, jaką jest linia falowodowa, będą zawsze bardzo duże w związku z przerwą w

dużej liczbie łączy, należy dołożyć wszelkich starań, aby zapewnić wysoką niezawodność wszystkich elementów składowych systemu.

W oparciu o zasady utrzymania kabli koncentrycznych jest wiadome, że oznaczanie i patrolowanie trasy pozwoli na zmniejszenie liczby odkopowań. Taki sam skutek będzie miało zakopywanie linii na głębokości poniżej 1,3 metra. Ponadto przewiduje się w miejscach szczególnie zagrożonych, jak w punktach przecięcia z torami kolejowymi lub drogami, stosowanie dodatkowych zabezpieczeń zewnętrznych. Falowody będą wypełniane przepływającym w sposób ciągły azotem, utrzymywanym pod niewielkim ciśnieniem dla uniknięcia wpływów tlenu i pary wodnej, których częstotliwości rezonansowe przypadają w pasmie przenoszenia linii. Dla uniknięcia wpływów korozji będzie stosowana ochrona katodowa oraz odpowiednie powłoki ochronne.

Poza zmniejszeniem prawdopodobieństwa uszkodzeń chodzi również o zmniejszenie skutków w przypadku ich wystąpienia. Z tego względu trzeba dążyć do opracowania skutecznych metod wykrywania i usuwania uszkodzeń oraz oddawania linii do ponownego użytku tak szybko, jak to jest tylko możliwe. Jednym z istotniejszych zagadnień jest na przykład zapewnienie możliwości jak najdokładniejszego określenia miejsca uszkodzenia i wydaje się, że będzie można to uzyskać metodami pomiarów impulsowych. Jednym z poważnych niebezpieczeństw dla tego typu linii, znacznie groźniejszym niż dla linii kablowych, jest zanieczyszczenie falowodów na przykład na skutek powodzi. Należy się spodziewać, że przy opracowaniu odpowiednich metod instalowania i utrzymania linii uda się uzyskać następujące parametry niezawodności pracy linii falowodowej:

Liczba uszkodzeń	0,3 uszkodzenia/1000 mil/rok
Średni łączny czas wykrywania i usuwania uszkodzenia	11 godzin.

1.7. Tłumienność zainstalowanej linii falowodowej

Jak stwierdzono poprzednio, tłumienność falowodu zależy nie tylko od tolerancji wykonania i przypadkowych niejednorodności toru wprowadzanych w trakcie instalacji linii, lecz również od strat w miedzi i strat wskutek konwersji pożądaných modów fal w mody niepożądane spowodowanych zakrzywieniami toru falowodu w płaszczyznach poziomej i pionowej. Wielkość tych strat zależy nie tylko od kąta i promienia krzywizny zakrzywienia, lecz także od geometrii przejścia z odcinka prostego na odcinek zakrzywiony, przy czym należy dążyć do ograniczenia liczby występujących w związku z tym nieciągłości. Prowadzone obecnie prace badawcze mają na celu bliższe poznanie parametrów ilościowych i jakościowych tych zjawisk. Typowe zależności w tym względzie przedstawiono na rys. 5.

Jak z nich wynika, dla dolnego zakresu częstotliwości przeważają straty w miedzi, a dla górnego zakresu straty konwersji modów fal. Należy oczekiwać możliwości zmniejszenia strat w górnym zakresie częstotliwości poprzez ulepszenie metod projektowania, produkcji i konstrukcji falowodów. W odniesieniu do zakresu dolnego, jeżeli nie uda się zmniejszyć strat w miedzi, będzie to istotny argument na rzecz zwiększenia średnicy wewnętrznej falowodów. Jednakże szerszemu wykorzystaniu większych częstotliwości w pobliżu około 110 GHz stoi, jak na razie, na przeszkodzie brak

odpowiednich generatorów mocy na ten zakres częstotliwości.

1.8. Projektowanie trasy

Jak wynika z poprzednich rozważań, istnieje konieczność szczegółowego uprzedniego wytyczenia trasy linii falowodowej z wykreśleniem odpowiednich profili w płaszczyznach poziomej i pionowej oraz opracowaniem takich metod instalacji, które pozwolą na zmniejszenie liczby i ostrości zakrzywień toru falowodowego. Trzeba wziąć również pod uwagę dostępne informacje geologiczne, hydrologiczne, dotyczące stabilności podłoża oraz przeszkód na trasie, których można ewentualnie uniknąć przez wybór innej trasy.

Należy zauważyć, że przy wykorzystaniu fotogrametrii powietrznej można uzyskać dokładność topograficzną 10 cm w płaszczyźnie poziomej i pionowej. Technika pomiarów na falach podczerwonych może być wykorzystana do wykrywania właściwości podłoża na trasie, a głównie typu granitu, poziomu lustra wody podskórnej, głębokości podłoża skalnego. W tym zakresie jest jeszcze wiele do zrobienia w odniesieniu do metod gromadzenia, zapisywania i odczytywania danych, m.in. przy zastosowaniu zasad zdalnych pomiarów i przekazywania danych. Musi być również określana optymalna liczba tych danych, aby nie "zgubić się" w ich nadmiarze.

1.9. Zasady projektowania systemu

Mając wysokiej jakości falowód oraz opracowane metody projektowania, budowy i utrzymania linii falowodowej należy określić zasady optymalizacji linii dalekosiężnej, która ma połączyć ze sobą dwa określone punkty na mapie. Należy przy tym uwzględnić za-

również czynniki techniczne jak i ekonomiczne oraz mieć na względzie to, że poprawa jednego parametru może wpłynąć na pogorszenie drugiego i każde rozwiązanie musi być rozwiązaniem kompromisowym. Sprawy te obrazuje schematycznie rys. 6. Przykładowo można podać następujące przeciwstawne czynniki rzutujące na wybór końcowego rozwiązania:

- a/ koszt takiego prowadzenia linii, aby uzyskać mały stopień zakrzywienia toru w porównaniu do zalet uzyskania wyższej jakości transmisji;
- b/ koszty budowy przy prowadzeniu linii przez trudne obszary, a koszty wzrostu długości linii przy ich omijaniu;
- c/ koszty dodatkowych metod ochrony w stosunku do kosztów utrzymania linii;
- d/ koszt urządzeń elektronicznych w stosunku do kosztów ośrodka transmisyjnego /falowodu/.

Należy zaznaczyć, że wiele tego rodzaju problemów musiało już być rozwiązywane przy optymalizacji tras linii kablowych, lecz w przypadku linii falowodowych sprawy komplikują się o tyle, że straty transmisji zależą w dużym stopniu od geometrii trasy. Łatwiejsze określanie optymalnych rozwiązań będzie można prawdopodobnie uzyskać przy wykorzystaniu elektronicznej techniki obliczeniowej.

2. FALOWODY CYLINDRYCZNE DO TRANSMISJI NA DUŻE ODLEGŁOŚCI WIELU SYGNAŁÓW TELEFONICZNYCH LUB TELEWIZYJNYCH

Badania w zakresie linii falowodowych są prowadzone we Francji od 1964 roku w laboratoriach stowarzyszenia Cables de Lyon, należącego do CGE przy finansowym poparciu Poczty Francuskiej. Badania dotyczą głównie warunków rozchodzenia się fal modu TE_{01} w falowodach cylindrycznych pełnych i spiralnych.

Falowody pełne były wykonywane w postaci rur bimetalicznych stalowo-miedzianych lub rur stalowych pokrytych elektrolitycznie warstwą miedzi. Niektóre z nich zostały dodatkowo pokryte wewnątrz warstwą dielektryku-polietylenu o grubości od 0,1 do 0,2 mm. Przeprowadzane pomiary impulsowe tłumienności takich falowodów dla częstotliwości 35 GHz dały następujące wyniki:

- 3,8 dB/km dla falowodu bimetalicznego o średnicy 50 mm,
- 4,2 dB/km dla falowodu stalowego pokrytego miedzią o średnicy 50 mm,
- 6,8 dB/km dla falowodu bimetalicznego pokrytego warstwą polietylenu.

Te dość duże tłumienności wynikają w znacznej mierze ze zbyt małej prostoliniowości odcinków falowodów, powodujących częściową konwersję modu TE_{01} w mod niepożądany TE_{12} . Należy się jednak spodziewać lepszych wyników przy włączaniu w trakt falowodowy spiralnych filtrów tłumiących niepożądane mody fal. Tak na przykład przy zastosowaniu jednego odcinka falowodu spiralnego o długości 3 m ze specjalną powłoką absorbującą na każde 15 od-

cinków tej samej długości normalnego falowodu tłumienność maleje do 3;3 dB/km. Opóźnienie czasowe mierzone za pomocą 6 ps impulsów wynosi przy tym zaledwie 4 ns na odcinek linii falowodowej o długości 1,2 km, podczas gdy przy braku filtrów byłoby ono co najmniej dziesięć razy większe.

Według opinii fachowców francuskich największe nadzieje rokuje jednak zastosowanie falowodów spiralnych, za pomocą których zrealizowano doświadczalną linię w pobliżu Lannion w Bretanii oraz na trasie Meudon - Saint Amand koło Paryża. Falowody te zostały wykonane przez nawijanie pokrytego emalią drutu miedzianego na stalowy rdzeń, pokrywanie go taśmami z włókna szklanego lub materiału absorpcyjnego oraz umieszczanie całości w płaszczu ochronnym, przy czym jako środek lepiący i usztywniający całość konstrukcji zastosowany został klej epoksydowy wtłaczany pod ciśnieniem. Po zastygnięciu i utwardzeniu całości rdzeń jest usuwany z wnętrza w ten sposób utworzonej rury, której oba końce są następnie odpowiednio szlifowane w celu umożliwienia połączenia ze sobą odcinków falowodów. Uzyskiwana przy tym dokładność średnicy wewnętrznej falowodu wynosi co najmniej 17 mikronów dla wszystkich typów falowodów.

W praktyce przeprowadzano doświadczenia głównie z dwoma rodzajami falowodów: sztywnymi odcinkami falowodu, umieszczonymi w stalowej rurze i wykorzystywanymi na prostych odcinkach trasy, oraz elastycznymi odcinkami falowodu ze spiralnie nawiniętymi taśmami metalowymi, pokrytymi dodatkowo dla ochrony taśmami z włókna szklanego i klejem epoksydowym, do realizacji zakrzywionego toru linii falowodowej /rys. 7 i 8/.

Tłumienność fali modu TE_{01} dla takiego typu falowodu wynosi o-

koło 3 dB/km przy częstotliwości 35 GHz i poniżej 2 dB/km przy częstotliwości 70 GHz dla odcinków prostoliniowych falowodu o średnicy wewnętrznej 50 mm. Przy średnicy wewnętrznej falowodu 70 mm tłumienności te wynoszą odpowiednio 1,3 dB/km i 1,8 dB/km. Straty transmisji na skutek zakrzywień toru linii falowodowej są zmniejszane przez dodatkowe nawinięcie na zewnętrznej powierzchni falowodu spiralnego taśm z materiału absorbującego. Dzięki temu tłumienność transmisji modu podstawowego TE_{01} wzrasta zaledwie dwukrotnie przy promieniu krzywizny wygięcia falowodu 20 m i częstotliwości pracy systemu 35 GHz.

Przeprowadzono szereg badań praktycznych nad sprawą zakrzywień toru linii falowodowej przy zastosowaniu falowodów spiralnych o różnych średnicach. Wykazały one, że najmniejszy dopuszczalny promień zakrzywienia wynosi 2 m przy falowodzie o średnicy wewnętrznej 30 mm.

Opóźnienie czasowe jest mniejsze od 1 ns na 7 km długości falowodów o średnicach wewnętrznych 50 mm i 70 mm, lecz nie może być pomijane w przypadku falowodów o mniejszych średnicach oraz stosowania na trasie przejść między odcinkami falowodów o różnych średnicach. Przy małych promieniach zakrzywień toru falowodu zachodzi konieczność stosowania odpowiednich kolanek z lustrami dla zmiany kierunku rozchodzenia się fali.

Rozpatrywane falowody spiralne były albo układane w rowach wzmocnionych ściankami z betonu, albo wciągane w plastikowe rury, znajdujące powszechne zastosowanie do kabli telefonicznych, w obszarach miejskich. W tym przypadku połączenia między kolejnymi odcinkami falowodu były realizowane w studzienkach przed wprowadzeniem tego odcinka do prowadzącej rury plastikowej. Fa-

lowód jest odporny na działanie siły ciągnięcia do 5 ton, a elastyczność falowodu owiniętego wzmacniającą taśmą metalową jest w pełni zadowalająca dla umożliwienia układania się falowodu zgodnie z przebiegiem plastikowej rury prowadzącej, której średnica nie przekracza na ogół 70 mm.

Kołnierze złączy są dokręcane zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara na jednym końcu i przeciwnie do tego kierunku na drugim końcu każdego odcinka falowodu, a zakończenia falowodu są maszynowo dopasowywane do wymiarów kołnierzy złączy /rys. 9/. Po połączeniu złączy są w celach ochronnych owijane polietylenem. W przypadku połączeń rozłączanych stosuje się rozwiązanie przedstawione na rys. 10.

W trakcie instalowania linia falowodowa jest na bieżąco kontrolowana za pomocą zestawu impulsowych przyrządów pomiarowych, zainstalowanych w wozie pomiarowym należącym do CNET. Przyrządy te pozwalają na pomiar impulsów odbitych o poziomie 70 dB mniejszym od poziomu impulsów nadawanych.

Po zakończeniu prac instalacyjnych linia falowodowa jest wypełniana suchym powietrzem pod ciśnieniem 2,7 atmosfery za pomocą specjalnego kompresora. W przyszłości przewiduje się rozmieszczenie w regularnych odstępach w linii falowodowej dielektrycznych przegród gazoszczelnych w celu zmniejszenia szkodliwych wpływów uszkodzenia linii falowodowej na pewnym odcinku. Jednocześnie przegrody te będą zapobiegały wtargnięciu wody do dłuższego odcinka falowodu.

Chociaż dotychczasowe wyniki badań linii falowodowej wydają się bardzo zachęcające, to jednak przyjmuje się powszechnie, że szersze zastosowanie falowodów do budowy linii telekomunikacyj-

nych będzie dopiero wówczas w pełni ekonomicznie uzasadnione, gdy długość elementarnego odcinka falowodu będzie wynosiła co najmniej 10 metrów dla zmniejszenia liczby złączy i czasu instalacji linii. Obecnie prowadzone prace zmierzają do opracowania zasad masowej produkcji falowodów spiralnych o teoretycznie nieograniczonych długościach przy znacznie obniżonych kosztach produkcji, co może przynieść przełom w poglądach na stosowanie linii falowodowych.

3. SPRAWOZDANIE Z PROWADZONYCH WE FRANCJI BADAN W ZAKRESIE LINII FALOWODOWYCH I PERSPEKTYWY NA PRZYSZŁOŚĆ

3.1. Prace doświadczalne

Zakres prowadzonych we Francji prac nad typami falowodów przydatnych do zastosowania przy budowie linii falowodowych do dalekośćnej łączności został dość szczegółowo omówiony w referacie J. Bedayana i G. Comte'a. W referacie niniejszym zostały przedstawione prace dotyczące innych aspektów budowy linii falowodowej, a mianowicie urządzeń stacji końcowych i przekaźnikowych oraz metod pomiarowych, jak również wyniki dotychczasowych badań.

Pierwsze dwie doświadczalne linie falowodowe zrealizowane na terenie centrum badawczego w Lannion miały długości 1200 m i 600 m, przy czym w pierwszym przypadku falowód był troskliwie instalowany w rynn timerelbetonowej, a w drugim ułożony bezpośrednio w ziemi. Prowadzone próby miały na celu przebadanie różnych

produkowanych na małą skalę typów falowodów, skontrolowanie zmian ich właściwości w czasie oraz opracowanie najbardziej prawidłowych metod instalowania i łączenia ze sobą odcinków falowodów. Próby obejmowały falowody cylindryczne o wewnętrznych średnicach 50 mm i 70 mm zarówno falowody metalowe pokryte warstwą dielektryka, jak i falowody spiralne z ekranem i bez ekranu w postaci blachy miedzianej między właściwym falowodem spiralnym i zewnętrzną ochraniającą rurą stalową.

Ogólne wyniki doświadczeń można podsumować jak następuje: w rozpatrywanym zakresie częstotliwości 30-70 GHz najlepsze wyniki daje zastosowanie falowodów spiralnych, szczególnie w przypadku zakrzywień toru falowodu, przy czym lepszy jest falowód z ekranem miedzianym. Próby z falowodami o różnych średnicach wykazały, że tłumienność prostoliniowych odcinków falowodu maleje proporcjonalnie do trzeciej potęgi promienia. Wyniki szczegółowe są przedstawione w tabl. 2.

Jednocześnie przeprowadzano pomiary opóźnienia grupowego, które wykazały, że dla kanału o szerokości 35 MHz na częstotliwości 35 GHz nie przekraczają one jednej nanosekundy, co należy uznać za wynik całkowicie zadowalający.

Biorąc pod uwagę pozytywne wyniki wstępnych badań zaproponowano realizację odcinka linii falowodowej pomiędzy stacją linii radiowej w Meudon i stacją wzmacniakową w Saint Amand, instalowanej w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Opis linii podany jest w referacie Y. Harlenta.

Zasadniczym wnioskiem wyciągniętym z tych doświadczeń jest stwierdzenie, że falowód spiralny dzięki łatwości jego zginania może być instalowany na podobnych zasadach co kabel koncentrycz-

Tablica 2

Typ falowodu	Często- tliwość GHz	Tłumiennosc prostolini- owego falo- wodu dB/km	Dodatkowa tłumienność dla danego promienia zakrzywienia toru w dB/rad		
			R=50 m	R=30 m	R=10 m
Falowód bez ekranu średnica 50 mm	35	3,05	0,15	0,35	1
	50	1,85	1,05		
	70	2,0	1,2	1,8	4,8
Falowód z ekranem średnica 50 mm	35	3,05	0,02	0,04	0,1
	50	1,85	0,2	0,3	0,65
	70	2,0	0,5	0,75	1,5
średnica 70 mm	35	1,15			

ny i w związku z tym koszty budowy linii kablowej i falowodowej powinny być podobne. Jeżeli więc zostaną odpowiednio obniżone koszty produkcji samych falowodów, zastosowanie tego typu linii na trasach o przewidywanej przepustowości od 50.000 do 100.000 kanałów telefonicznych może okazać się już w niedługim czasie ekonomicznie w pełni uzasadnione. Z tych też powodów powzięto w 1970 roku decyzję przyspieszenia prac nad uruchomieniem półtaśmowej produkcji falowodu, która pozwoliłaby na obniżenie jego ceny jednostkowej oraz kontynuowanie prac nad optymalizacją metod jego instalowania. Odcinki falowodu uzyskane w pierwszych etapach tej półtaśmowej produkcji charakteryzują się mechanicznymi właściwościami nie odbiegającymi od właściwości odcinków falowodów realizowanych uprzednio w warunkach produkcji doświadczalnej. Cena informacyjna około 65 franków za jeden metr bieżący falowodu czyni jego koszty porównywalnymi z kosztami innych typów linii transmisyjnych.

3.2. Sprawozdanie z prac nad urządzeniami

Z wyjątkiem szczególnego przypadku linii Meudon - Saint Amand do 1970 roku nie prowadzono kompleksowych prac w zakresie kompletnych urządzeń przekaźnikowych dla linii falowodowych, ograniczając prace laboratoryjne do wykonania niektórych układów, które mogą wchodzić w skład takich urządzeń. Spośród tego typu układów należy wymienić generatory fal milimetrowych o mocy wyjściowej kilkadziesiąt mW, zrealizowane przy zastosowaniu diod IMPATT, oraz mało szumne mieszacze odbiorcze, przy czym zainteresowania konstruktorów ograniczały się do zakresu częstotli-

wości 35-70 GHz. Rozważane jest przy tym wykorzystanie dwóch częstotliwości pośrednich, a mianowicie około 500 MHz dla pierwszej generacji urządzeń i około 1 GHz dla urządzeń przyszłościowych, w związku z czym opracowano wzmacniacze na oba zakresy częstotliwości.

W 1970 roku rozpoczęto prace nad urządzeniami stacji przekaznikowych przy założeniu zakończenia ich w latach 1973-74 w zastosowaniu do linii falowodowych o długościach od 100 do 200 km. Od prawidłowego działania tych urządzeń zależy w dużej mierze powodzenie w budowie linii falowodowych. Ustalono wstępnie, że zarówno po stronie nadawczej jak i odbiorczej będzie wykorzystywana częstotliwość pośrednia 500 MHz, generator nadajnika i generator odbiornika będą wykonane w technice półprzewodnikowej i że w każdym kanale radiowym będzie możliwa z szybkością 106 Mbit/s transmisja dwóch ciągów impulsów na zasadzie czteropoziomowej modulacji fazy. Każdy z tych ciągów będzie przy tym odpowiadał sygnałom 1440 kanałów telefonicznych. W pierwszym okresie przewiduje się pracę urządzeń w ograniczonym pasmie częstotliwości 32-40 GHz.

Dalsze przewidywane prace będą szły w kierunku zwiększenia pojemności transmisji oraz opracowania metod bezpośredniej modulacji fali nośnej.

3.3. Sprawy techniczne i ekonomiczne systemu

Szczegółowe studia w zakresie porównania kosztów linii kablowych, radiowych i falowodowych wykazały, że system linii falowodowych staje się konkurencyjny z innymi systemami dla długości li-

nii od 100 do 200 km przy przepustowości kilku tysięcy kanałów telefonicznych oraz dla długości 500 km lub powyżej przy przepustowości 15.000 do 20.000 kanałów. W rozważaniach uwzględniono oszczędności na końcowe urządzenia wielokrotne, które w przypadku transmisji cyfrowej są prawie o połowę tańsze /przynajmniej we Francji/ niż w przypadku transmisji analogowej. Wynik analizy może wydawać się zaskakujący, ale wynika on po pierwsze z założenia możliwości instalowania falowodu przy stosunkowo niskich kosztach w tych samych warunkach jak normalnych kabli, a po drugie z ograniczenia od górnej granicy pasma wykorzystywanych częstotliwości do 70 GHz. Zmniejsza to co prawda znacznie przepustowość transmisyjną systemu, ale zmniejsza również koszty i kłopoty związane z instalowaniem i wyrównywaniem wzdłuż linii prostej toru linii falowodowej o bardzo dużej przepustowości. Ponadto ze względu na koszty i niezawodność pracy systemów łączności może się okazać bardziej korzystne prowadzenie obok siebie dwóch linii falowodowych o mniejszych przepustowościach zamiast jednej linii o przepustowości sumarycznej.

3.4. Perspektywy przyszłościowego rozwoju

Powyższe rozważania teoretyczne potwierdzone wynikami badań praktycznych w połączeniu z przewidywanym rozwojem francuskiej sieci łączności telefonicznej wykazują wyraźnie, że już w latach 1970-1980 będzie w pełni uzasadnione zainstalowanie linii falowodowych na trasach o łącznej długości 3.000 - 4.000 km. Aby to było technicznie możliwe, postanowiono zrealizować w 1971 r. odcinek doświadczalny o długości 10 km w Lannion, który pozwoli na

sprawdzenie w praktyce nowych produkowanych fabrycznie falowódów oraz pierwszych generacji urządzeń. Jeżeli wyniki prób okażą się zadowalające w latach 1973-74, przy zastosowaniu tego samego rodzaju urządzeń, zostanie zbudowana linia o długości 200 km. Przeprowadzi się wówczas również doświadczenia z drugą generacją urządzeń, pozwalających na transmisję cyfrową z szybkością 500 Mbit/s w każdym kanale radiowym. W odniesieniu do samego falowodu prace badawcze będą zmierzały do określenia optymalnej średnicy falowodu jako kompromisu między kosztem produkcji na jednostkę długości falowodu a odległością między stacjami przekaźnikowymi. W związku z tym zostanie w najbliższym czasie uruchomiona również produkcja falowodu o średnicy 70 mm.

Reasumując można oczekiwać w 1978 r. uruchomienia przez Francuską Poczta pierwszej w pełni sprawnej eksploatacyjnie linii falowodowej, o ile wszystkie założone prace będą przebiegały zgodnie z planem.

4. LINIA DOŚWIADCZALNA MEUDON - SAINT AMAND

4.1. Wstęp

Po próbach wstępnych przeprowadzonych pod kierunkiem CNET na linii doświadczalnej w Lannion wydawało się rzeczą niezbędną zainstalowanie linii falowodowej w warunkach zbliżonych do warunków normalnej eksploatacji. Ponadto próby te wykazały, że do transmisji falowodowej na krótkie odcinki można wykorzystywać również modulację częstotliwości, co pozwalało na uruchomienie nowej linii falowodowej bez czekania na opracowanie specjalnych

urządzeń transmisji cyfrowej, przystosowanych do współpracy z liniami falowodowymi.

Linie tę postanowiono zrealizować na trasie Meudon - Saint Amand o długości około 10 km, łączącej stację mikrofalowej linii radiowej w Meudon z centralną stacją wzmacniakową w Saint Amand, z odgałęzieniem na odległości 5 km od Meudon.

Przebiega ona przez obszary miejskie zawierające wiele przeszkód podziemnych, które trzeba było omijać w trakcie instalowania linii. Pierwsze 5.305 m falowodu zostało ułożone w rowie w łózysku betonowym na niekorozyjnym podłożu z czystego piasku, które zostało następnie nakryte pokrywą cementową dla ochrony przed ewentualnymi uszkodzeniami przez koparki. Na pozostałym odcinku falowód został wciągnięty w istniejące rury prowadzące systemu kablowego.

4.2. Zastosowane falowody i elementy

Zastosowano głównie sztywny falowód spiralny o wewnętrznej średnicy 50 mm, z zewnątrz chroniony przez rurę stalową. Parametry różnego typu falowodu podano w tabl. 3. Przy prostoliniowym przebiegu tłumienność falowodu wynosi 3 dB/km. Może być on wyginany przy minimalnym promieniu krzywizny 50 m, przy czym dodatkowa tłumienność wynosi 0,15 dB/rad. W przypadku zakrzywień toru falowodu o promieniu krzywizny mniejszym niż około 10 m należało zastosować elastyczny falowód spiralny, który ma ochronny pancerz stalowy w postaci klamer. Ponadto na pewnych odcinkach trasy zaistniała konieczność zastosowania falowodów o średnicach mniejszych: 45 mm lub 30 mm /na przykład w przypad-

T a b l i c a 3

Częstotliwość 35 GHz					
Typ	ϕ w mm	Tłumien- ność od- cinka prostego	R = 50 m	R = 10 m	R = 2,5 m
sztywny	50	3 dB/km	0,15 dB/rad		
półela- styczny bez ekranu	50	3 dB/km	0,15 dB/rad	0,96 dB/rad	F = 70 GHz 1,15 dB/rad
półela- styczny z ekranem	50	3 dB/km		0,11 dB/rad	F = 70 GHz 1,19 dB/rad
półela- styczny	45	4,5 dB/km			0,17 dB na falowód
elastycz- ny	30	17 dB/km			
Kolanko z lustrem	50	0,50 dB			
	70	0,35 dB			

Falowód

ku potrzeby wykorzystania istniejącej kanalizacji kablowej/. Połączenia między odcinkami falowodów o różnych średnicach były realizowane za pomocą stożkowych układów dopasowujących. Okazało się, że wprowadzają one bardzo małe dodatkowe tłumienie, ale działają w pewnym stopniu zakłócająco na propagację fal w falowodzie.

Dla zmian kierunku toru falowodu o 90° stosowano kolanka falowodowe, co było szczególnie przydatne w przypadku wprowadzania falowodu do budynku. Wprowadzane przez nie dodatkowe tłumienie nie jest do pominięcia, ponadto powodują one powstawanie fal modów niepożądanych, zwłaszcza TE_{02} , w związku z czym były one stosowane tylko w razie ostatecznej konieczności.

Produkowane odcinki falowodu o długości 2,87 m są ze sobą połączone za pomocą złączy pierścieniowych dwóch rodzajów: złącza rozłączalne zapewniają doskonałość centryczności połączeń i dobre dopasowanie mechaniczne /nieprzepuszczalność/, ale odznaczają się dużymi wymiarami i ich koszt jest znaczny oraz złącza nierozłączalne typu śrubowego dają się łatwiej w praktyce zrealizować, ich koszt jest niższy i są one niezastąpione ze względu na swoje małe wymiary w przypadku wciągania falowodu do rur prowadzących.

4.3. Kontrola w trakcie instalowania falowodu

W odniesieniu do szczelności falowodu kontrolowana jest każda zakończona sekcja linii falowodowej w ciągu 12 do 24 godzin poprzez pomiar ciśnienia azotu na końcu kontrolowanej sekcji przy uwzględnieniu zmian temperaturowych. Kontrola elektryczna w

trakcie układania falowodu była przeprowadzana za pomocą echometru na częstotliwości 35 GHz. Ponadto przeprowadzano oczywiście pomiary tłumienności każdej zmontowanej sekcji falowodu.

4.4. Wyniki badań

Dla każdej z dwóch części rozpatrywanej linii falowodowej przeprowadzono szczegółowe badania. Tłumienność linii falowodowej między Meudon i CNET o długości 6,4 km wynosiła 35 dB, co odpowiada średniej wartości tłumienia 5,5 dB/km. Tłumienność linii falowodowej między CNET i Saint Amand o długości 3,3 km wynosiła 28 dB, co odpowiada 7 dB/km. Pomiary te przeprowadzono na częstotliwości 35 GHz. W najbliższej przyszłości zostaną one uzupełnione pomiarami tłumienności oraz pomiarami opóźnień czasowych dla innych częstotliwości.

Przy wyposażeniu linii w urządzenia o modulacji częstotliwości pozwala ona na transmisję w każdym z trzech kanałów radiowych, sygnałów 1800 kanałów telefonicznych.

4.5. Urządzenia nadawcze

Modulatory. W trzech modulatorach częstotliwości wytwarzane są sygnały nośne o częstotliwościach 175 MHz, które po zmieszaniu z sygnałami odniesienia o bardzo stałych częstotliwościach /387,5, 425 i 462,5 MHz/ tworzą sygnały wyjściowe o częstotliwościach 425, 500 i 575 MHz /produkt mieszania jest przepuszczany przez dwukrotny powielacz/. Każdy z kanałów pośredniej częstotliwości ma pasmo 50 MHz i pozwala na przenoszenie sygnałów 1800 kanałów telefonicznych.

Wzmacniacze średniej mocy. Sygnały trzech kanałów pośredniej częstotliwości są ze sobą łączone i wzmacniane we wzmacniaczu pracującym w zakresie częstotliwości 400-600 MHz o mocy wyjściowej od 10 do 15 dB.

Układ przemienny częstotliwości. Zadaniem jego jest przekształcanie sygnałów częstotliwości pośredniej w sygnały nośne zakresu fal milimetrowych. Wzmocnienie układu wynosi 0 dB, a przy zastosowaniu filtru górnej wstęgi bocznej i dupleksera moc sygnału wyjściowego wynosi +10 dBm.

4.6. Duplekser /zwrotnica/

Zadaniem tego układu jest oddzielenie kierunku nadawania od kierunku odbioru i połączenie linii falowodowej jednocześnie z nadajnikiem i odbiornikiem. Działa ona na zasadzie filtracyjnego podziału pasma częstotliwości na dwa podpasma, przy czym szczególną uwagę przy projektowaniu układu trzeba zwrócić na tłumienność sygnałów nadawania w pasmie odbioru.

4.7. Odbiornik

Mieszacz. Za duplekserem zmontowany jest mieszacz częstotliwości, pracujący przy zastosowaniu diody Schotthy'ego, do której dochodzą sygnały odbierane z linii falowodowej i z lokalnego generatora pracującego na diodzie lawinowej. Na wyjściu otrzymuje się sygnały częstotliwości pośredniej.

Wzmacniacz sygnałów częstotliwości pośredniej o małym poziomie szumów. Współpracujący z mieszaczem wstępny stopień czę-

stotliwości pośredniej charakteryzuje się wzmocnieniem 25 dB w pasmie 400 - 600 MHz.

Układ przemiany częstotliwości pośredniej. Na wyjściu tego układu otrzymuje się trzy niezależne sygnały o częstotliwościach 175 MHz odpowiadające sygnałom częstotliwości pośredniej 425, 500 i 575 MHz.

Demodulator. Składa się on z trzech jednostek pracujących w układach demodulatorów częstotliwości sygnałów o częstotliwościach nośnych 175 MHz. Każda jednostka współpracuje z niezależnym wzmacniaczem pasma podstawowego /sygnału zbiorczego telefonii nośnej/.

4.8. Stacja końcowa

Stacja końcowa składa się z jednego stojaka zawierającego urządzenia nadawcze i odbiorcze dla trzech kanałów transmisyjnych o przepustowości 1800 kanałów telefonicznych każdy.

4.9. Wnioski

Przeprowadzone próby w pełni potwierdziły przydatność linii falowodowych dla sieci telekomunikacyjnych. Na razie ograniczono się do transmisji sygnałów analogowych, ale w najbliższej przyszłości transmitowane będą również sygnały PCM przy wykorzystaniu zasad 4-poziomowej modulacji fazy. Transmisja sygnałów PCM będzie prawdopodobnie powszechnie stosowana w systemach przyszłościowych na większe odległości.

5. PROJEKTOWANIE MECHANICZNE I PARAMETRY FALOWODÓW CYLINDRYCZNYCH PRZYSTOSOWANYCH DO PRZESYŁANIA FALI MODU TE_{01}

5.1. Wstęp

W referacie przedstawiono postępy prac w zakresie traktów linii falowodowych przystosowanych do transmisji sygnałów za pomocą fal modu TE_{01} , omawiając nie tylko sposób, ale i uzasadnienie wyboru danej konstrukcji falowodu. Wybrano konkretny sposób rozwiązania, ale nie oznacza to, że jest to jedynie możliwe lub nawet optymalne w każdych warunkach rozwiązanie, w związku z czym w toku dalszych doświadczeń, zwłaszcza przeprowadzanych w terenie, będą badane i inne warianty rozwiązań.

Jednym z decydujących czynników przy wyborze rodzaju stosowanego falowodu jest ogólny koszt produkcji i instalacji elementów traktu falowodowego. Przykładowo, jeżeli przyjąć, że koszty produkcji i instalacji traktu falowodowego będą mniej więcej równe kosztom stacji końcowych i przekaźnikowych przy pełnym obciążeniu systemu, to w pierwszym okresie przy niepełnym wykorzystaniu systemu, procentowy udział kosztów budowy traktu w całej inwestycji będzie odpowiednio większy. Jest również rzeczą istotną opracowanie takiej konstrukcji falowodu, aby mógł on spełniać również wymagania przyszłościowe, ponieważ trakt falowodowy instalowany w chwili obecnej musi pracować w sposób ciągły i zadowalający przez wiele lat, podczas gdy urządzenia stacji końcowych i przekaźnikowych mogą ulegać zmianom zgodnie ze wzrostem za-

potrzebowania na przepustowość transmisyjną systemu oraz odpowiednio do zmian w zakresie technologii.

5.2. Wybór rodzaju falowodu

Pierwsze ustalenia w odniesieniu do osiągalnych metod produkcyjnych pozwoliły na stwierdzenie, że nie ma większych różnic w kosztach produkcji falowodów spiralnych oraz falowodów rurowych pokrytych warstwą dielektryku. Z tego względu postanowiono skoncentrować prace i badania nad falowodem spiralnym ze względu na lepsze charakterystyki transmisyjne traktu falowodowego, wykonanego wyłącznie z odcinków falowodu spiralnego.

Większość typów falowodów spiralnych wykonywanych dotychczas miała postać spirali z drutu, umieszczonej w płaszczu stalowym, który stanowił integralną część składową konstrukcji falowodu. Okazało się jednak, że można uzyskać wiele korzyści w odniesieniu do właściwości elektrycznych, operacyjnych i kosztów produkcji falowodu przy rozdzieleniu spiralnego falowodu od metalowego płaszcza i wykonywaniu falowodu w postaci spirali z drutu wzmocnionej konstrukcyjnie i usztywnionej za pomocą włókien szklanych i żywicy epoksydowej. Falowód ten zostaje z kolei wprowadzony do ochronnej rury stalowej o wyrównanym prostoliniowym przebiegu, zabezpieczającej falowód przed uszkodzeniami mechanicznymi i zapewniającej ułożenie falowodu w linii prostej.

Oczekiwane korzyści z zastosowania tego typu konstrukcji w porównaniu do konstrukcji falowodu sztywnego z rurą stalową stanowiącą jego integralną część są następujące:

1/ znacznie lepsze tolerancje wykonania, ponieważ kurczenie się

żywicy epoksydowej zachodzi tylko w kierunku promieniowym i jest jednakowe na całej długości odcinka falowodu. Stwierdzono, że przez wyeliminowanie rury stalowej uzyskano 2-krotną poprawę w zmianach średnicy i około 2,5-krotną w owalności przekroju falowodu, ogólnie biorąc okazało się, że zmiany wymiarów odpowiadają zmianom kształtującego rdzenia;

- 2/ wszystkie procesy produkcyjne, poza wyciągnięciem rdzenia z gotowego odcinka falowodu, polegają głównie na nawijaniu i dlatego łatwo dają się ująć w normalnym cyklu produkcyjnym;
- 3/ zabezpieczona będzie dobra stabilność w czasie wymiarów falowodu w przypadku jego niezależnego umieszczenia w rurze falowodowej, ponieważ wszelkie zmiany w obciążeniu poszczególnych odcinków rury prowadzącej, powodowane na przykład przez ruchy warstw ziemi, prowadzące tylko do nieznacznych deformacji tych rur, nie będą miały żadnego wpływu na falowód; w praktyce byłoby prawdopodobnie niezbędne umieszczanie również falowodu spiralnego z płaszczem stalowym w ochronnej rurze stalowej, ponieważ sam płaszcz byłby zbyt małym zabezpieczeniem przed wpływami ruchów warstw ziemi i związanych z tym naprężeń.

Jednakże należy podkreślić, że stabilność zachowania wymiarów w ciągu długiego okresu czasu konstrukcji usztywniającej wykonanej z włókien szklanych i żywicy epoksydowej jest na razie niewiadomą i musi być obiektem szczegółowych badań;

- 4/ rura prowadząca nie tylko chroni falowód, ale również obniża koszty eksploatacji linii falowodowej i zwiększa niezawodność jej pracy /często w przypadku zewnętrznych uszkodzeń wystarczy tylko wymienić samą rurę ochronną/; dodatkową korzyścią

jest to, że przestrzeń między falowodem a rurą może być wypełniona gazem pod ciśnieniem, spadek którego sygnalizuje o uszkodzeniu rury ochronnej;

- 5/ zwiększa się elastyczność rozbudowy systemu z punktu widzenia czasowego rozłożenia kosztów inwestycji, ponieważ ze względu na względnie małe koszty rura prowadząca może być układana na założonej trasie w najbardziej dogodnym czasie /na przykład podczas prac drogowych/, a falowód jest wciągany do tej rury, gdy wymaga tego wzrost zapotrzebowania na łącza;
- 6/ ponieważ przewidywane koszty produkcji tego rodzaju falowodów są porównywalne z przewidywanymi kosztami produkcji falowodu w postaci rury pokrytej warstwą dielektryku, jest również rzeczą z punktu widzenia ekonomicznego obojętną stosowanie linii falowodowych "mieszanych", złożonych z odcinków falowodu spiralnego i falowodu sztywnego, co pozwala na wydajne tłumienie fal rodzajów niepożądanych, powstających w trakcie transmisji na skutek różnego rodzaju niejednorodności w falowodowej linii.

5.3. Metody produkcji falowodu

Jednym z zadań, które muszą być rozwiązane zanim będzie można stosować w praktyce na szerszą skalę linie falowodowe, jest zabezpieczenie masowej i stosunkowo taniej produkcji falowodów poprzez opracowanie właściwych metod.

W pracach projektowo-badawczych spiralę falowodu nawijano z drutu miedzianego pokrytego lakierem /stosunek miedzi do izola-

cji 1' : 0,17/. Rdzeń, na którym nawijany jest drut, umieszczony jest w pozycji pionowej, a odpowiednia metoda nawijania zabezpiecza układanie każdego zwoju równolegle do zwoju poprzedniego. Szybkość nawijania wynosiła około 10 minut na metr bieżący falowodu.

Nawinięty na rdzeń drut zostaje z kolei ściśnięty taśmami z włókien szklanych, które zostają nasyczone żywicą epoksydową tuż przed ich zastosowaniem. Proces nawijania falowodu spiralnego jest automatycznie kontrolowany, co zapewnia jednorodność konstrukcji i jednakową grubość ścian falowodu przy minimalnym dopuszczalnym wypełnieniu żywicą rowków między taśmami z włókien szklanych. Grubość ta wynosi 3 mm, a szybkość nawijania warstw usztywniających wynosi 3 minuty na 1 metr.

Odpowiednia stratność dielektryku jest zapewniona przez dodanie do żywicy sproszkowanego żelaza. Mieszanina o stosunku ciężarowym 6 : 1 daje materiał o przewodności 5 i kącie stratności 0,02 przy częstotliwości 35 GHz.

Stwierdzono, że w przypadku bezpośredniego podgrzewania falowodu po jego wykonaniu uzyskuje się pogorszenie tolerancji wymiarów, a ponadto następuje pofalowanie wewnętrznej powierzchni falowodu na skutek różnych współczynników rozszerzalności rdzenia, drutu spiralnego i włókien szklanych z żywicą epoksydową. Nie poznano jeszcze dokładnie mechanizmu tych zjawisk, lecz trudność ta została pokonana przez odpowiednie temperaturowe traktowanie falowodu, a mianowicie najpierw oziębianie przez 11 godzin oraz podgrzewanie przez 1 godzinę. Nie jest to jednak rozwiązanie idealne ze względu na dodatkowe koszty i trzeba będzie prowadzić badania w celu uproszczenia tego procesu.

5.4. Metody łączenia odcinków falowodów

Falowód będzie instalowany w terenie przez łączenie odcinków falowodu i wciąganie ich jeden po drugim w rurę prowadzącą ze studzienki instalacyjno-kontrolnej, a ponieważ wymiary tych studzienek są ograniczone ze względów ekonomicznych do 3 m, długość odcinków falowodów musi być również ograniczona do około 3 m. W związku z tym należy jednak stosować odpowiednią liczbę złączy na odcinek linii falowodowej, złącza te więc muszą być proste i tanie w realizacji oraz zapewniać utrzymanie stałych wymiarów wewnętrznych traktu falowodowego.

Sposób wykonania złącza przedstawiono na rys. 11. Kołnierz złącza jest formowany przez wciśnięcie rękawa na rdzeń i pokrycie całości ochronną warstwą taśmy z włókien szklanych oraz żywicy. Czop wewnętrzny jest utworzony przez odpowiednie obtoczenie końca odcinka falowodu. Dokładny rdzeń, zapewniający utrzymanie zarówno wymiarów wzdłużnych jak i poprzecznych złącza, jest następnie wyjmowany i czop jest silnie wpychany w kołnierz, który jest przedtem powlekany warstwą specjalnego lepiku oraz żywicy epoksydowej. Połączenie to jest dostatecznie mocne, aby umożliwić wepchnięcie nowego odcinka falowodu w rurę prowadzącą, a rdzeń przesuwamy na miejsce nowego złącza. Żywica epoksydowa zastyga w ciągu 1 godziny, dając trwałe połączenie wepchniętych do rury odcinków falowodu.

Długość poszczególnych odcinków falowodu będzie prawdopodobnie nieco różna na skutek przypadkowych niejednorodności produkcyjnych, w związku z czym będą pewne kłopoty z zachowaniem jednakowych odstępów między punktami podparcia falowodu.

5.5. Pomiary wymiarów falowodu

Wahania poprzecznych wymiarów falowodu są w trakcie produkcji kontrolowane za pomocą tłoka przesuwanego pod wpływem ciśnienia powietrza przy umieszczeniu falowodu w pozycji pionowej w układzie pomiarowym, przedstawionym na rys. 12. Odchylenia od prostoliniowości są mierzone za pomocą układu czterech tłoków, a wyniki pomiarów są odpowiednio rejestrowane. Maksymalny promień krzywizny zakrzywienia toru falowodu, który może być określony na podstawie pomiarów wynosi 2000 m, a minimalny kąt około 0,1 minuty kątowej.

W chwili obecnej możliwości produkcyjne ograniczają długość produkowanych odcinków falowodu do 1 m, które są łączone fabrycznie w odcinki o długości 3 m. Należy oczekiwać, że dane podane poniżej ulegną dalszej poprawie przy ulepszaniu metod produkcji falowodu, pozwalających na wykonanie odcinków o długości 3 m.

Niedokładności wymiarów, które stwierdzono na przykładzie 30 odcinków falowodu, są następujące:

- standardowe odchylenia średnicy = 6,8 μm
- średnia elipsowatość = 7,0 μm
- średnia krzywizna = 1/700 m^{-1}
- średnie odchylenie od prostoliniowości w punktach połączeń = 0,23 minut kątowych
- średnie zmiany średnicy w punktach połączeń = 8,25 μm .

5.6. Właściwości elektryczne

Tłumienność falowodu dotychczas produkowanego wynosi 2,9 dB/km dla częstotliwości 35 GHz. Tłumienność pomierzona jest większa od obliczonej, co wynika prawdopodobnie ze zbyt małej przewodności powierzchni falowodu spiralnego.

Obliczenia teoretyczne dodatkowej tłumienności powodowanej konwersją modu pożądanego na mody niepożądane dla wahań wymiarów i prostoliniowości falowodu omówionych uprzednio wykazują, że tłumienność ta powinna wynosić 0,036 dB/km przy 35 GHz, rosnąc do 0,11 dB/km przy 50 GHz, 0,46 dB/km przy 80 GHz i 1,05 dB/km przy 110 GHz.

Obliczenia zniekształceń sygnału powodowanych konwersją i rekonswersją modów dla rozpatrywanego rodzaju falowodu wykazują, że ten rodzaj zniekształceń powinien być do pominięcia dla wszystkich przewidzianych szybkości transmisji sygnałów cyfrowych.

6. ASPEKTY PLANOWANIA I INSTALOWANIA DOŚWIADCZALNEGO SYSTEMU LINII FALOWODOWEJ NA FALE MILIMETROWE

6.1. Wstęp

Prace rozwojowe w zakresie linii falowodowych prowadzone obecnie przez jednostki badawcze Brytyjskiej Poczty obejmują studia teoretyczne, prace laboratoryjne oraz prace w terenie nad doświadczalnymi odcinkami linii falowodowych o długości do 1 km. Przewiduje się budowę trasy linii falowodowej w normalnych warun-

kach pracy w celu uzyskania doświadczeń eksploatacyjnych. Linia taka o długości 30 km będzie łączyła ze sobą ośrodek badawczy w Martlesham Heath ze stacją przekaźnikową mikrofalowej linii radiowej w Mendlesham Suffolk, łączącej Londyn z Norwich.

Próby w terenie pozwolą na opracowanie zasad projektowania i budowy linii falowodowej oraz stacji przekaźnikowych jak również umożliwią określenie parametrów transmisyjnych, ekonomicznych i niezawodności pracy systemu, stanowiąc podstawę do określenia warunków pracy linii falowodowych instalowanych w sieci telekomunikacyjnej użytku powszechnego.

6.2. Krótki opis systemu

System doświadczalnej linii falowodowej został wybrany tak, aby umożliwić sprawdzenie technicznych i ekonomicznych aspektów różnych rozwiązań konstrukcyjnych i elektrycznych elementów składowych linii. Poza dwiema stacjami końcowymi w wymienionych wyżej miejscowościach w połowie drogi między nimi, w miejscowości Henley, budowana jest stacja przekaźnikowa. Zastosowana zostanie technika transmisji cyfrowej z koderami i dekodekami na stacjach końcowych oraz regeneratorami na wszystkich stacjach. Połączenie między stacją badawczą w Mortlesham Heath i centralnym rzędem pocztowym w Londynie będzie zrealizowane częściowo za pomocą linii falowodowej, a częściowo za pomocą wyżej wspomnianej linii radiowej Londyn-Norwich. Przesyłane będą sygnały szybkiej transmisji danych, wideofonii oraz inne sygnały szerokopasmowe.

6.3. Wybór trasy linii falowodowej

6.3.1. Ogólne czynniki wpływające na wybór trasy

Transmisja sygnałów w falowodzie cylindrycznym za pomocą fali modu TE_{01} jest w sposób krytyczny zależna od konfiguracji falowodu, a szczególnie od ostrych zakrzywień toru oraz nagłych zmian wymiarów w przejściach falowodowych. Im trasa linii falowodowej jest bardziej zbliżona do linii prostej, tym straty transmisji i zniekształcenia sygnału są mniejsze, a odstęp między stacjami przekaźnikowymi może być większy. Tak więc korzyści płynące ze stosowania dalekosiężnych linii falowodowych zależą w decydującym stopniu od troskliwego wyboru trasy i zastosowania właściwych metod instalacji.

Przy rozważaniu zastosowania falowodu jako linii telekomunikacyjnej łączącej centra o dużej gęstości zaludnienia wynikają duże korzyści z wytyczenia trasy linii falowodowych wzdłuż tras linii kolejowych lub autostrad łączących te centra, ponieważ wymagania obu systemów transportu i łączności są bardzo zbliżone w odniesieniu do minimalizacji zakrzywień torów w płaszczyznach poziomej i pionowej. Jeżeli wykorzystanie trasy linii kolejowej lub autostrady z różnych względów nie może wchodzić w rachubę, należy rozważyć możliwość prowadzenia linii falowodowej "na przełaj" wzdłuż linii prostej łączącej dwie miejscowości, jak to uczyniono w przypadku omawianej w rozdz. 3.2 linii doświadczalnej.

Wybór miejsc lokalizacji obu stacji końcowych w przypadku linii doświadczalnej został narzucony umiejscowieniem obu stacji telekomunikacyjnych podległych Poczcie Brytyjskiej. Przewiduje

się zbadanie warunków pracy systemu w zakresie częstotliwości przesłowych 32-100 GHz, przy czym umieszczenie stacji przekąnikowej w równej, 15-kilometrowej odległości od obu stacji końcowych pozwala w zależności od potrzeby na badanie danej linii w układzie linii dwuodcinkowej o długości 15 km każdego odcinka lub jednoodcinkowej o długości 30 km, m.in. w zależności od tłumienności falowodu dla danego zakresu częstotliwości pracy.

6.3.2. Szczegóły wyboru trasy

Trasa linii doświadczalnej została tak dobrana, aby jak najbardziej symulować warunki instalacji i eksploatacji przewidywane przy budowie systemów wchodzących w skład sieci telekomunikacyjnych, a w szczególności w odniesieniu do wykorzystania tras dróg i rurociągów do budowy linii oraz konieczności prowadzenia linii na pewnych odcinkach trasy "na przełaj" przez pola i lasy. Próbuje się instalowania linii wzdłuż dróg z utwardzoną powierzchnią, chodników w mieście i na poboczach dróg w pobliżu zainstalowanych urządzeń innych służb oraz na otwartych polach z sieciami drenów, rowów i innymi przeszkodami związanymi z geosstrukturą. Nie przewidziano jedynie instalowania linii falowodowej wzdłuż linii kolejowej ze względu na brak tej ostatniej w rozpatrywanym obszarze kraju, lecz wydaje się rzeczą oczywistą, że tor linii kolejowej będzie na ogół bardzo wygodny do prowadzenia linii falowodowej.

Wstępnie wybrano trasę linii na podstawie dostępnych map w połączeniu z inspekcjami w terenie, a następnie potwierdzono wynikiem obserwacji z powietrza i zdjęciami lotniczymi. Jako założenie

nie wstępnie przyjęto unikanie wszelkich zakrzywień trasy o promieniach krzywizny mniejszych od 500 metrów /w miarę możliwości jednego kilometra/. Stosowane metody pomiaru i przetwarzanie danych za pomocą maszyn matematycznych pozwoliły na wytyczenie trasy z dokładnością około 10 milimetrów. Zaplanowano umieszczenie falowodu na średniej głębokości 1,2 m pod poziomem powierzchni gruntu, aby uniknąć przypadkowych uszkodzeń przy orce oraz zmniejszyć wpływy zmian temperatury. W przypadkach gdy nie jest to możliwe, przewiduje się stosowanie odpowiednich metod ochrony, umieszczając na przykład falowód w rurach betonowych.

6.4. Budowa linii falowodowej

6.4.1. Konstrukcja

Sposób instalacji jest ściśle uzależniony od fizycznych kształtów falowodu oraz warunków realizacji trasy. Falowody /spiralne lub pokryte dielektrykiem/, w skład których wchodzi jako część integralna stalowa rura, mogą być w zasadzie umieszczane bezpośrednio w ziemi, lecz w przypadku niepewnego podłoża, na przykład przewidywanych ruchów warstw ziemi lub "tąpnięć" w terenach górniczych, lepiej umieszczać jest falowód w specjalnych przewodnicach odpowiedniego kształtu.

Alternatywną techniką stosowaną w przypadku, gdy rura stalowa nie wchodzi w skład konstrukcji falowodu, jest umieszczanie falowodu w stalowej rurze o odpowiednio większej średnicy. Ma to na przykład miejsce w przypadku falowodu spiralnego w postaci drutu nawiniętego na specjalną konstrukcję wsporczą wykonaną

z włókna szklanego. Falowód tego typu odznacza się dostateczną sztywnością konstrukcji przy małych długościach odcinków oraz wyjątkowo małym ciężarem na jednostkę długości. W przypadku tego typu falowodu można też zachować bardziej precyzyjne wymiary poprzeczne w porównaniu do falowodu w postaci rur stalowych pokrytych warstwą dielektryku, a to z tego względu, że w przypadku tego ostatniego wewnętrzne napięcia materiału występujące w trakcie produkcji mogą doprowadzać do stopniowego odkształcania ścianek.

Stalowa rura prowadząca /ochronna/ powinna mieć średnicę 100 mm lub nawet więcej. Poszczególne odcinki takiej rury są produkowane fabrycznie przy zachowaniu dostatecznej tolerancji w odniesieniu do prostoliniowości, a specjalnie opracowane metody łączenia tych odcinków zapewniają jej utrzymanie przy jednoczesnej gazoszczelności złącz. W trakcie budowy linii falowodowej w wykopie instalowana jest najpierw rura prowadząca, a dopiero później umieszczany w niej falowód. Rura ta decyduje o prostoliniowości falowodu poprzez odpowiednie wewnętrzne konstrukcje wsporcze rozmieszczone w odstępach co kilka metrów, uzależnionych od właściwej dla danego typu falowodu sztywności jego konstrukcji. Jednocześnie falowód jest w ten sposób chroniony od niewielkich ruchów warstw gruntu, w których umieszczona jest rura prowadząca, a wpływy bardziej silnych ruchów tych warstw są również w dużym stopniu zmniejszone. W miejscach bardziej narażonych na tego typu ruchy sztywność rury prowadzącej może być dodatkowo zwiększona przez zastosowanie łożysk betonowych. Stalowa rura prowadząca chroni nie tylko przed stopniowymi mechanicznymi odkształceniami falowodu, lecz również przed przypadkowymi uszkodzeniami oraz prądami błądzącymi.

Jeszcze jedną korzyścią płynącą ze stosowania rury prowadzącej jest to, że może być ona kładzona w ziemi w porze roku dogodnej dla rolnika, podczas gdy umieszczenie w niej falowodu może odbywać się później w miarę potrzeby.

6.4.2. Metody instalowania

Metalowa rura prowadząca musi być układana wzdłuż wytyczonej trasy z możliwie dużą dokładnością. Jest rzeczą bardzo pożądaną zmechanizowanie tego procesu, ponieważ tylko w ten sposób można uzyskać wystarczającą dokładność i szybkość instalowania przy niezbyt wygórowanych kosztach. Szybkość instalowania jest sprawą istotną nie tylko z ekonomicznego punktu widzenia, ale również w celu skrócenia okresu "wykopków", co jest zwłaszcza istotne przy terenach rolniczych. W celu prostoliniowego układania rury prowadzącej do sterowania maszyny instalującej należy zastosować technikę optycznych pomiarów geodezyjnych, przy czym musi być zapewniona prostoliniowość jednocześnie w płaszczyznach pionowej i poziomej. Optymalny typ maszyny nie jest jeszcze ustalony, lecz typ preferowany pracuje w ten sposób, że kopie ona wąski rów o specjalnym kształcie dna /średnia głębokość 1,2 m/, niezależnie od zmian kształtu powierzchni gruntu. Dalszych prac wymaga również określenie optymalnych metod łączenia i układania w rowie rur prowadzących, ale zakłada się wykonywanie tych operacji również w sposób ciągły. Następnie powinno być skontrolowane prostoliniowe ułożenie rury i ustalone jej położenie w rowie, ustabilizowane za pomocą betonu w miejscach bardziej krytycznych, a rów z powrotem zasypyany.

W odstępach co kilkadziesiąt metrów wzdłuż trasy linii falowodowej będą instalowane specjalne studzienki o takich wymiarach, aby umożliwić wprowadzanie odcinków falowodu o długości do trzech metrów. W punktach tych będzie następowało łączenie odcinków falowodu i wsuwanie ich jeden po drugim do rury prowadzącej. Łączna średnica falowodu wraz z dodatkowymi obejmami na złączach będzie znacznie mniejsza od wewnętrznej średnicy rury prowadzącej, tak że falowód będzie mógł utrzymywać swoją "krótkodystansową" liniowość w granicach wewnętrznej średnicy rury prowadzącej. Po zainstalowaniu falowód zostanie sprawdzony i pomierzony za pomocą pomiarów impulsowych ze względu na możliwość wystąpienia nieprzewidzianych niejednorodności toru w postaci na przykład niesprawnych złączy i każda sekcja linii falowodowej będzie oddzielnie napełniona suchym azotem pod ciśnieniem. Rura prowadząca zostanie również napełniona suchym powietrzem pod nieco niższym ciśnieniem, a niezależnie od tego poszczególne odcinki zostaną oddzielone przegrodami wodoszczelnymi.

6.5. Wymagania na urządzenia końcowe i przekaźnikowe

Przewiduje się, że w liniach falowodowych, pracujących w sieciach telekomunikacyjnych użytku publicznego, urządzenia przekaźnikowe będą rozmieszczone w odległościach między 15 a 30 km, w zależności od wielu różnych lokalnych czynników. Tak duża odległość pozwala na znaczną dowolność w odniesieniu do wyboru punktów lokalizacji stacji ze względu na lokalne wymagania i wa-

runki, przy czym stacje przekaźnikowe mogą być instalowane zarówno pod, jak i na powierzchni ziemi. Pozwoli to na dużą elastyczność rozwiązań projektowych i pełne uwzględnienie warunków topograficznych. Poza czynnikami omówionymi uprzednio należy ponadto uwzględnić dostępność źródeł zasilania energetycznego oraz łatwość dojazdu do punktów lokalizacji stacji przekaźnikowych. Przewiduje się, że badania doświadczalne i eksploatacyjne dostarczą dalszych informacji na temat warunków pracy i optymalnego sposobu wykonania urządzeń tych stacji.

6.6. Zagadnienie kontroli i utrzymania

Duża przepustowość rozpatrywanego systemu łączności falowodowej na falach milimetrowych wymaga nie tylko dużego stopnia dokładności i niezawodności uwarunkowanego metodami budowy linii, ale również zapewnienia odpowiednich sposobów kontroli, pozwalających na szybkie wykazanie wystąpienia uszkodzeń lub innych zakłóceń w torze linii falowodowej, a nawet w miarę możliwości dostarczających informacji o wystąpieniu warunków sprzyjających powstaniu takich uszkodzeń.

Instalowanie falowodu w ośrodku ochronnym w postaci wypełnionej gazem rury stalowej umożliwia wcześniejsze ostrzeżenie o powstaniu jakiegokolwiek uszkodzenia, prowadzącego do przebicia rury prowadzącej i obniżenia ciśnienia gazu w rurze. Pozwolić to może na wcześniejsze ustalenie miejsca uszkodzenia i zreperowanie jego, zanim spowoduje to jakiegokolwiek typu zaburzenie w pracy falowodu. W przypadku uszkodzenia natomiast samego falowodu, miejsce uszkodzenia może być szybko zlokalizowane w opar-

ciu o określenie odległości odbicia impulsów pomiarowych. Sposób usuwania uszkodzenia będzie oczywiście zależał od rodzaju tego uszkodzenia, lecz w większości wypadków będzie niestety niezbędne do tego odkopanie pewnego odcinka traktu falowodowego.

Wystąpienie uszkodzeń lub warunków sprzyjających powstaniu tych uszkodzeń w odniesieniu do urządzeń stacji końcowych i przekaznikowych będzie sygnalizowane lokalnie, a w przypadku systemów zdalnego nadzoru sygnały informujące o uszkodzeniu na stacji przekaznikowej będą przesyłane do dozorującej stacji końcowej za pomocą dodatkowego kabla małowymiarowego.

6.7. Sprawy ekonomiczne

Wybór prostoliniowej trasy linii falowodowej związany jest nie tylko z optymalnymi warunkami propagacji fal modu TE_{01} w tych warunkach, ale podyktowany jest również względami ekonomicznymi. W przypadku odchyień od idealnie prostoliniowej trasy rosną szybko koszty budowy linii falowodowej z dwóch zasadniczych powodów. Po pierwsze na skutek większej długości linii przy torze zakrzywionym rosną koszty zużytego materiału i instalowania linii falowodowej. Po drugie wzrasta tłumienność linii zarówno na skutek wzrostu jej długości jak i szkodliwej konwersji modu pożądanego na mody niepożądane na odcinkach zakrzywień, co zmusza do stosowania stacji przekaznikowych w mniejszych odstępach i podnosi koszt budowy linii falowodowej. Tak więc przy projektowaniu linii należy brać pod uwagę, co jest bardziej opłacalne, prowadzenie linii po trasie najdogodniejszej ze względów topograficznych czy też po linii prostej kosztem wzrostu nakładów inwestycyjnych.

7. PROWADZONE PRZEZ POCZTĘ BRYTYJSKĄ BADANIA SYSTEMU ŁĄCZNOŚCI FALOWODOWEJ NA FALE MILIMETROWE

7.1. Wstęp

Pocшта Brytyjska zajmuje się od wielu lat zagadnieniem transmisji dalekosiężnej za pomocą mało stratnych falowodów cylindrycznych. Ponieważ badaniami w zakresie falowodów spiralnych i transmisji sygnałów cyfrowych zajęły się inne jednostki badawcze, pocшта ograniczyła swoje zainteresowanie do transmisji sygnałów analogowych za pomocą falowodów w postaci rur pokrytych warstwą dielektryku.

W latach sześćdziesiątych nie było już wątpliwości, że realizacja systemów łączności falowodowej jest technicznie możliwa, ale ze względów praktycznych mało interesująca. W szczególności zadowalające były jeszcze parametry lamp na fale milimetrowe. W przypadku stosowania - jak się wydawało najbardziej korzystnej - transmisji sygnałów cyfrowych PCM pojawiały się nowe problemy związane ze skomplikowaniem techniki układowej. Ponadto nie występowało jeszcze tak duże zapotrzebowanie na przepustowość transmisyjną systemów, które uzasadniałoby potrzebę wprowadzania do użytku linii falowodowych, w związku z czym, zwłaszcza w perspektywie rozwoju linii satelitarnych, prace nad liniami falowodowymi zeszły na plan dalszy.

W przeszło dziesięć lat później zaistniała jednak zupełnie inna sytuacja. Wzrosło ostatnio gwałtownie zapotrzebowanie na wszel-

kiego rodzaju łącza, a przewidywania na przyszłość są jeszcze bardziej zachęcające w tym względzie, w związku z czym pojawiła się wyraźnie potrzeba rozwoju systemów transmisyjnych o bardzo dużych przepustowościach, wykazujących potencjalne możliwości obniżenia kosztów jednostkowych na łącze. Jednocześnie nastąpił znaczny postęp w technice wytwarzania elementów półprzewodnikowych na fale milimetrowe, a w szczególności diody typu IMPATT, tranzystory mikrofalowe i obwody scalone dla techniki cyfrowej, co pozwala realnie na budowę niezawodnych i niezbyt kosztownych urządzeń stacji końcowych i przekaźnikowych.

7.2. Założenia wyjściowe

Celem niniejszego referatu jest przedstawienie prac Poczty Brytyjskiej w zakresie wykorzystania zasad transmisji fal modu TE_{01} w falowodach do realizacji w sieci telekomunikacyjnej niezawodnych i niezbyt kosztownych systemów linii falowodowych, przy czym poza problemami wykonania urządzeń i falowodów musi być rozwiązane wiele zagadnień praktycznych związanych z budową linii falowodowych.

7.3. Organizacja prac badawczych

Ośrodek badawczy zajmujący się pracami w zakresie linii falowodowych na fale milimetrowe zlokalizowany jest w Martlesham Heath i podzielony na trzy oddziały. Oddział pierwszy zajmuje się ogólnymi zagadnieniami optymalizacji systemu, biorąc pod uwagę aspekty elektryczne i mechaniczne jego działania, jak również względy ekonomiczne. Oddział drugi jest odpowiedzialny za rozwiązanie za-

gadnień modulacji, oraz opracowanie modeli urządzeń stacji przekaznikowych na zakres częstotliwości 32 - 100 GHz. Prace oddziału trzeciego zmierzają do zaprojektowania trasy doświadczalnej, obejmując ponadto sprawy metod pomiarów, kontroli i dozoru linii oraz sprawy związane z wyborem trasy i instalacją linii falowodowej.

Należy podkreślić, że poza wymienionym ośrodkiem badawczym w pracy nad liniami falowodowymi zaangażowanych jest również wiele innych jednostek badawczych, projektowych i produkcyjnych spoza Poczty Brytyjskiej, a wyniki tej współpracy są bardzo owocne.

7.4. Realizowany program prac badawczych

7.4.1. Sprawy systemowe

W okresie wstępnym podjęcia prac nad zagadnieniami linii falowodowych szereg decyzji musiało być podjętych arbitralnie. Niektóre z nich, na przykład zastosowanie jednej rury falowodu dla obu kierunków transmisji, koncentracja prac raczej nad systemami transmisji cyfrowej niż analogowej i zastosowanie elementów półprzewodnikowych przy budowie urządzeń, były całkowicie słuszne, ale większość podstawowych parametrów systemu została dobrana jako kompromis między przeciwstawnymi wymaganiami i może ulec rewizji w toku dalszych prac.

Wybrano falowód cylindryczny o średnicy wewnętrznej 50 mm jako najbardziej dogodny do transmisji w pasmie częstotliwości 40 - 90 GHz. Ze względu na początkowe trudności w uzyskaniu odpowiednich elementów do budowy urządzeń w górnym zakresie tego

pasma postanowiono prowadzić pracę nad urządzeniami końcowymi i przekaźnikowymi w dwóch etapach - w pierwszym etapie w zakresie częstotliwości do 50 GHz, a w drugim - również dla większych częstotliwości, przy czym założone parametry systemów przedstawiono w tabl. 4.

T a b l i c a 4

Pasma częstotliwości i parametry doświadczalnych systemów

	Etap I	Etap II	
Pasmo częstotliwości	32 - 50	5-90 /lub 100/	GHz
Nominalna szerokość pasma kanału	0,5	2 /lub 2,5/	GHz
Liczba kanałów	2x15 lub 2x16	2x8	
Przybliżona maksymalna szybkość transm./kanał	500	2000	Mbit/s

Jako podstawową szybkość transmisji sygnałów cyfrowych PCM przyjęto 250 Mbit/s i jej wielokrotności, ale przy doborze parametrów elementów składowych systemów starano się zapewnić możliwości ich pracy również przy szybkości transmisji o 20% większej.

7.4.2. Falowody

Po wstępnym rozpatrzeniu różnych typów falowodów zdecydowano się skoncentrować prace nad wykonaniem falowodu spiralnego wzmocnionego konstrukcyjnie włóknem szklanym i przewidzianego

do umieszczenia wewnątrz stalowej rury prowadzącej o odpowiednio większej średnicy, chroniącej falowód przed uszkodzeniami i szkodliwymi wpływami zewnętrznymi. Jednocześnie Poczta Brytyjska spowodowała rozpoczęcie w laboratoriach uniwersytetu londyńskiego prac nad falowodami pokrytymi warstwą dielektryku. Ostateczny wybór jednego z wymienionych lub też zastosowanie kombinacji obu typów falowodów przy budowie linii falowodowych zostaną dokonane później przy uwzględnieniu przede wszystkim aspektów ekonomicznych.

7.4.3. Zwielokrotnienie, modulacja i przepustowość

Przebadano różne metody i warianty wielokrotnego wykorzystania toru falowodowego i przyjęto następnie rozkład kanałów radiowych 15+15 lub 16+16 w pasmie częstotliwości 32-50 GHz.

Teoretyczne studia nad rodzajami modulacji były poparte badaniami praktycznymi różnych typów modulatorów i demodulatorów 2 i 4-poziomowych. W przypadku 4-poziomowej modulacji fazy w etapie I każdy kanał pozwalałby na transmisję sygnałów z przybliżoną szybkością 500 Mbit/s, co odpowiadałoby całkowitej przepustowości 100.000 kanałów telefonicznych. W ten sposób system ten byłby w pełni porównywalny ze stosowanymi w Wielkiej Brytanii liniami kablowymi o największej przepustowości, pracującymi przy zastosowaniu kabli koncentrycznych 9,5 mm o pasmie przeniesienia 60 MHz. Przy wykorzystaniu zasad zwielokrotnienia częstotliwościowego całkowita pojemność systemu o wiązce 18-rurowej wynosić może do 97.200 kanałów telefonicznych. Zastosowanie urządzeń przekaźnikowych przewidzianych do realizacji w e-

tapie II pozwoliłoby na potrojenie przepustowości linii falowodowej opracowanej zgodnie z założeniami etapu I.

7.4.4. Urządzenia przekaźnikowe

Pierwsze w pełni półprzewodnikowe urządzenia tego typu zostały wykonane w końcu 1968 roku. Od tej chwili prowadzono intensywne prace nad ich ulepszeniem. Wyniki tych prac są omówione w innych referatach zgłoszonych i opublikowanych w materiałach konferencji wymienionej w tytule niniejszego opracowania.

7.5. Prace w ośrodku badawczym w Martlesham

Ponieważ wspomniany ośrodek zajmuje obszar około 100 akrów, możliwe było zainstalowanie na tym terenie wielu urządzeń i odcinków traktów falowodowych. Między innymi zrealizowano tu doświadczalną linię falowodową o długości 1 km z urządzeniami końcowymi, umieszczonymi w niewielkich budynkach. Falowody w pobliżu jednego końca linii są poprowadzone powyżej, a w pobliżu drugiego końca linii poniżej powierzchni gruntu, wchodząc do piwnicy budynku stacji.

W części "ponad ziemią" znajdują się urządzenia pozwalające na badania linii falowodowej przy różnych promieniach zakrzywienia przebiegu falowodu. Część "pod ziemią" składa się z zakrzywionych i prostych odcinków falowodu, przy czym dzięki zdejmowanym pokrywom i dla tej części linii możliwy jest zawsze stosunkowo łatwy dostęp do falowodu.

7.6. Badania doświadczalne w terenie prowadzone przez Pocztę Brytyjską

Jedynym realnym sposobem przebadania linii i uzyskania odpowiedzi na wszelkiego rodzaju wątpliwości jest zainstalowanie jej na próbnej trasie. Dla tych celów zainstalowano linię próbną na trasie ośrodek badawczy w Marilesham - stacja przekaźnikowa mikrofalowej linii radiowej w Mendlesham, prowadząc linię wzdłuż dróg, poprzez okolice podmiejskie i otwarte pola.

Przewiduje się, że badania w terenie powinny przede wszystkim wykazać, czy:

- 1/ urządzenia stacji końcowych i przekaźnikowych wykonane w laboratoriach zdają praktyczny egzamin w terenie;
- 2/ jest możliwość skutecznego i ekonomicznego układania linii falowodowej w różnych warunkach spotykanych w praktyce;
- 3/ metody dozoru, kontroli, lokalizacji uszkodzeń są zadowalające w normalnych warunkach pracy,
- 4/ ocena kosztów realizacji systemów operacyjnych była realistyczna i uzyskano spodziewane korzyści w porównaniu do najbardziej nowoczesnych rozwiązań linii kablowych.

Jeżeli wyniki badań zarówno w odniesieniu do strony technicznej jak i ekonomicznej zagadnienia okażą się zadowalające, to zostaną podjęte decyzje o budowie systemu dla normalnej eksploatacji w sieci telekomunikacyjnej. Gdyby były to jednak wyłącznie badania resortu łączności bez udziału przemysłu, to nawet przy pozytywnych wynikach tych badań prace podjęte nad wykonaniem pro-

tototypu produkcyjnego urządzeń i traktu falowodowego byłyby bardzo opóźnione. W związku z tym uznano jako warunek podstawowy powodzenia całego przedsięwzięcia jak najwcześniejsze zainteresowanie przemysłu brytyjskiego całą sprawą, co pozwoli na maksymalne skrócenie odstępu czasu między badaniami doświadczalnymi a uruchomieniem systemu dla warunków normalnej eksploatacji.

W trakcie prób zostaną przebadane różne warianty rozwiązań poszczególnych elementów wchodzących w skład systemu, instalowanych w dodatku w różnych warunkach jego pracy, w związku z czym przewiduje się wyciągnięcie podstawowych wniosków w odniesieniu do optymalizacji rozwiązania przyszłościowych linii falowodowych. W tym celu zawarto szereg kontraktów z firmami uczestniczącymi w przeprowadzaniu eksperymentu.

7.7. Ogólne parametry systemu

Falowód cylindryczny o średnicy 50 mm charakteryzuje się małym tłumieniem dla fal modu TE_{01} w zakresie częstotliwości 50 - 90 GHz i proponuje się wykorzystanie tego zakresu do utworzenia ośmiu kanałów radiowych dla każdego kierunku, umożliwiających szybką transmisję sygnałów cyfrowych /około 2 Gbit/s/. Jednym z bardziej trudnych do rozwiązania problemów będzie wyrównanie opóźnień grupowego w kanale o tak szerokim pasmie, zwłaszcza w odniesieniu do kanałów rozmieszczonych w pobliżu dolnego zakresu pasma 50 GHz.

Dla zakresów częstotliwości poniżej 50 GHz i powyżej 90 GHz proponuje się utworzenie kanałów o szerokościach 500 MHz. Ze

względem na wymaganą znacznie większą moc nadawania dla mniejszych częstotliwości sugeruje się przesunięcie dolnej częstotliwości granicznej wykorzystywanego pasma do około 36-40 GHz zamiast proponowanej początkowo 32 GHz. Ponadto należy rozpatrzyć celowość umieszczenia w dolnym zakresie pasma kilku dodatkowych kanałów o węższych pasmach przenoszenia, przystosowanych do transmisji sygnałów telewizyjnych przy wykorzystaniu zasad transmisji analogowej. W tabl. 5 przedstawiono niektóre warianty rozwiązań.

7.8. Możliwości perspektywiczne

W miarę rozwoju techniki budowy urządzeń półprzewodnikowych na coraz większe częstotliwości w zakresie 100-200 GHz możliwe będzie zastosowanie falowodów o znacznie mniejszych średnicach /około 20 mm/ na tle elastycznych, aby można było wprowadzić je do rur prowadzących, istniejących dotychczas linii falowodowych o większych średnicach. Jakość połączeń realizowanych za pomocą tych nowych falowodów o mniejszych średnicach nie pozwoli na stosowanie ich w sieci podstawowej, lecz ze względu na znacznie niższe koszty instalowania będą one mogły pracować w liniach odgałęźnych i liniach obejściowych w razie awarii linii sieci podstawowej.

Tablica 5

Pasma częstotliwości, liczba kanałów wielkiej częstotliwości i maksymalne przepustowości przyszościowych systemów

	A	B	C	D	
Pasmo częstotliwości	20-31 /30-35/	32-50 /36-50/	50-90	90-110	GHz
Nominalna szerokość pasma kanału	0,05	0,5	2	0,5	GHz
Przybliżona maksymalna szybkość transmisji na kanał	-	500	2000	500	Mbit/s
Przybliżona maksymalna przepustowość na kanał /Telef./	-	7200	28000	7200	łączy
Przybliżona maksymalna przepustowość na kanał /TV, 625-L/	1	4	16	4	łączy
Liczba kanałów	2x40	2x16 /2x12/	2x8	2x16	-
Przybliżona maksymalna przepustowość linii falowodowej dla sygnałów telefonicznych	-	115000 /86000/	230000	115000	łączy
Przybliżona maksymalna przepustowość linii falowodowej	40	64 /48/	128	64	łączy

U w a g a : Pasmo A wykorzystane do analogowej transmisji sygnałów telewizyjnych na małe odległości

8. BADANIA SYSTEMÓW LINII FALOWODOWYCH

8.1. Metody kładzenia falowodu

Grupa badawcza Niemieckiej Poczty Federalnej w Darmstademie jest zaangażowana w pracach nad falowodami i urządzeniami końcowymi stosowanymi w systemach transmisyjnych. Jednocześnie prowadzi się badania w zakresie określania optymalnych metod instalowania falowodów, będących kompromisem pomiędzy wymaganymi parametrami transmisyjnymi a technologią wykonania i budowy linii falowodowej.

Wybór padł na tzw. technikę budowy "rura w rurze", którą ilustruje rys. 13. Plastikne pierścienie z rolkami samosmarującymi są nakładane na cylindryczny falowód w odstępach co około 1,5 m. Odcinki falowodów o długości 5 - 6 m są "wsuwane" w rury ochronne PVC. Odcinki te są z kolei łączone za pomocą gazoszczelnych kołnierzy tworząc linie falowodowe o maksymalnej długości 1,5 km. Również rury PVC są ze sobą łączone gazoszczelnie i napełniane gazem, dzięki czemu falowody nie tylko są chronione przed korozją, ale również podwójnie zabezpieczone przed wilgocią. Ogólnie biorąc, korzyści płynące z takiej metody kładzenia linii falowodowej są następujące:

- 1/ możliwość wykorzystania podobnych technik kładzenia linii falowodowej, jakie są znane i rozwijane w technice linii kablowych;
- 2/ dzięki zastosowaniu ochronnych rur nie zachodzi potrzeba robót podziemnych, a wymiana uszkodzonego odcinka falowodu może odbywać się poprzez studzienki;

- 3/ uzyskuje się wysoką niezawodność linii przy ograniczeniu prac podziemnych tylko do stosunkowo nieskomplikowanych prac w okresie budowy linii.

8.2. Falowodowa linia doświadczalna 3×3 km

Równocześnie z pracami badawczymi była realizowana budowa linii doświadczalnej. W celu wypróbowania trzech różnych typów falowodów wytwarzanych w NRE ułożono obok siebie równolegle 3 rury PVC, każda o długości 3 km i średnicy 12,6 cm, na trasie pokazanej na rys. 14. Na trasie zrealizowano 6 zakrzywień toru o nominalnym promieniu krzywizny 300 m, które obejmują ogółem 30% długości linii.

Technika "rura w rurze" wymaga podziału linii na odcinki instalacyjne około 7 m, których złącza wykonane są w studzienkach /oznaczenia K Sch 2, 4 i 7 na rys. 14/. Pomiędzy nimi znajdują się mniejsze wymiarowo studzienki, w których odcinki rur są połączone za pomocą złączy śrubowych.

W rurach plastikowych PVC ułożono odpowiednio:

- 1/ 3 km falowód aluminiowy pokryty dielektrykiem /40 μ / z "filtrami blaszkowymi" wtrąconymi co 30 m, zajmującymi 3,3% całkowitej długości linii;
- 2/ 3 km falowód aluminiowy pokryty dielektrykiem z filtrami spiralnymi wtrąconymi co 18 m, zajmującymi 5,5% całkowitej długości linii;
- 3/ 2,5 km falowód zwijany, przy czym brakujące 0,5 km zostanie ułożone w najbliższym czasie.

Filtr blaszkowy składa się z blaszek plastikowych z nałożoną warstwą aluminium, prostopadłych względem siebie i ustawionych jedna za drugą w falowodzie. Tłumią one falę modu TE_{12} powstającą na skutek konwersji modu podstawowego o około 32,5 dB na metr długości filtru.

Maksymalna długość falowodu "wpychanego" do rury PVC ze studzienki wynosiła 1,6 km, przy czym ulegał on elastycznym deformacjom zgodnie z zakrzywieniami trasy linii.

Wewnętrzna średnica wszystkich trzech typów falowodów wynosi 7 cm, a nie 5 cm, co jest powszechnie stosowane za granicą. Aczkolwiek zwiększenie średnicy oznacza pewne ograniczenie pasma przepustowego linii, wybór średnicy 7 cm podyktowany był następującymi względami:

- 1/ zmniejszeniem zakresu pracy systemu do 12-40 GHz, co pozwala na zastosowanie obwodów scalonych i ułatwia realizację urządzeń końcowych;
- 2/ łatwiejszym zachowaniem względnej tolerancji w wymiarach przekroju, co polepsza właściwości elektryczne linii;
- 3/ założeniem, że przy mniejszej średnicy jest łatwiejsze wytwarzanie falowodów zwijanych, które nie wydaje się już obecnie słuszne. Wybór średnicy falowodu linii doświadczalnej nie przesądza jednak ostatecznej decyzji w tym względzie.

8.3. Wyniki pomiarów tłumienności różnych typów falowodów

Rysunek 15 pokazuje zależność tłumienności od częstotliwości trzech typów falowodów pokrytych dielektrykiem, przy czym krzy-

we 1a i 1b odnoszą się do odcinków prostych, a krzywa 1c do odcinka falowodu z zakrzywieniem obejmującym około 30% długości linii.

Rysunek 16 obrazuje warunki topologiczne istniejące w terenie, gdzie zrealizowana została linia falowodowa, średnią jej tłumienność na kilometr oraz tłumienność poszczególnego odcinka przy transmisji na częstotliwości 35 GHz. Różnica w tłumienności falowodu pokrytego dielektrykiem i falowodu spiralnego wynika m.in. z różnic w przewodnościach ścianek oraz dodatkowej tłumienności filtrów blaszkowych wtrąconych w falowód pokryty dielektrykiem, która wynosi około 0,6 dB/km.

8.4. Prowizoryczny model systemu

Równocześnie prowadzone są prace nad projektem budowy 30-kilometrowej linii doświadczalnej, przy czym jeden odcinek przekaznikowy powinien być gotowy za 3 do 4 lat, oraz badania laboratoryjne mające doprowadzić do realizacji optymalnych rozwiązań urządzeń końcowych, na przykład budowane specjalne filtry pozwolą na zbadanie zjawisk wzajemnych interferencji w przypadku pracy w wielu kanałach radiowych. Poza dotychczas przeprowadzonymi doświadczeniami z transmisją sygnałów PCM, które będą dalej kontynuowane, przewiduje się próby z modulacją częstotliwości, która może wykazywać pewne zalety w przypadku transmisji na małe odległości, m.in. pozwala to na wykorzystanie już istniejących urządzeń, podczas gdy urządzenia końcowe PCM są dopiero w stadium opracowywania.

Opracowane przez Poczte Niemiecką modulatory z diodami wa-

raktorowymi pozwalają na bezpośrednie kluczowanie fazy fali modu TE_{10} ; jest to ogólnie uważane za prawidłowe rozwiązanie chociaż prowadzone są w wielu instytutach badawczych próby w zakresie modulacji częstotliwości pośredniej. Przeprowadzone badania dowiodły, że w zakresie częstotliwości 15-30 GHz mogą być w zadowalający sposób stosowane produkowane przemysłowo diody, przy czym głównym zagadnieniem jest określenie optymalnych warunków dopasowania między diodą i falowodem. Zasada działania modulatora opiera się na wykorzystaniu zależności impedancji diody od wartości przyłożonego napięcia, przy czym wartość ta jest tak dobrana, aby uzyskać przesunięcie fazy 180° . Wymagania w odniesieniu do parametrów mechanicznych i elektrycznych mogą być spełniane przez zastosowanie specjalnych odcinków falowodów, odznaczających się większą elastycznością w porównaniu do konwencjonalnych falowodów.

Do chwili obecnej stosowano wyłącznie kluczowanie amplitudy, przy czym ze względu na straty diody i jej obudowę górny zakres wykorzystywanych częstotliwości wynosił 35 GHz. Docelowo zamierza się stosować kluczowanie fazy przy zastosowaniu diod typu PIN wykonanych bez obudowy, co pozwoli na zmniejszenie strat.

Prowadzone są również prace nad układami odbiorczymi, a w szczególności szerokopasmowym detektorem i mieszaczem, na wyjściu którego uzyskuje się częstotliwość pośrednią 1,5 GHz. Ten ostatni układ jest realizowany na zasadzie obwodów paskowych /rys. 17/ i dopasowany do połączenia z prostokątnym odcinkiem falowodu. W połączeniu z układem generatora i prostownika układ mieszacza stanowi zwartą jednostkę konstrukcyjną, która może być bezpośrednio połączona z separacyjnym filtrem kanałowym /rys. 18/.

8.5. Wyniki przeprowadzonych do tej pory prób transmisji sygnałów impulsowych

Pierwsze orientacyjne pomiary stopy błędu przeprowadzone przy przesyłaniu sygnałów cyfrowych o szybkości do 8 Mbit/s pozwoliły na ustalenie, że stabilność częstotliwości nadawania powinna wynosić około 10^{-7} oraz dały pewne informacje w odniesieniu do stosunku sygnału do szumów niezbędnego do uzyskania stopy błędu 0. Przy zastosowaniu laboratoryjnego systemu 800 Mbit/s możliwe okazało się uzyskanie bezbłędnej regeneracji jakiegokolwiek znaku w kodzie 7-bitowym /rys. 19/, co pozwoli na transmisję sygnałów telewizyjnych, reprezentowanych w doświadczeniu przez sygnał zębatki. Próby z systemem 320 Mbit/s wykazały występowanie zniekształceń impulsów powodowanych opóźnieniami czasowymi, co oznacza, że już przy szybkości transmisji około 100 Mbit/s niezbędna będzie dodatkowa kompensacja opóźnień czasowych. W tym celu opracowano specjalny układ kompensatora na częstotliwość pośrednią 1,2 GHz o charakterystyce opóźnienia czasowego odwrotną do takiejże charakterystyki falowodu i pracujący na zasadzie filtru grzebieniowego.

8.6. Model urządzeń przekaźnikowych

Równolegle z pracami nad linią falowodową prowadzone są prace nad urządzeniami stacji przekaźnikowych, przystosowanymi do przesyłania sygnałów cyfrowych o szybkości transmisji 264 Mbit/s przy czym możliwa będzie praca tych urządzeń równolegle w dwóch kanałach. Przez podwójną przemianę częstotliwości druga często-

tliwość pośrednia 1254 MHz może być taka sama dla wszystkich kanałów radiowych. Urządzenia będą przystosowane do pracy w zakresie częstotliwości 31,35 - 33,858 GHz przy dwupoziomowym kluczowaniu fazy za pomocą diod typu PIN.

8.7. Przyszłościowe perspektywy rozwoju linii falowodowych

Z perspektywicznych planów rozwoju sieci telekomunikacyjnej do 1985 roku wynika, że w związku z przewidywanym rozwojem wideofonii wprowadzenie do użytku linii falowodowych będzie prawdopodobnie ekonomicznie uzasadnione na początku lat osiemdziesiątych. Zakładając, że liczba abonentów "wideofonicznych" będzie wynosiła tylko 0,2% liczby abonentów telefonicznych, wymagana przepustowość sieci telekomunikacyjnej będzie dwukrotnie większa w porównaniu do planowanej na 1985 rok bez uwzględnienia powstania nowych służb. Jeżeli założymy ponadto, że koszty linii kablowej stają się porównywalne z kosztami linii falowodowej przy przepustowości około 20.000 kanałów telefonicznych, to oznacza to, że w 1985 roku linie falowodowe będą tańsze od linii kablowych dla około 1260 km sieci linii dalekosiężnych w NRF. Jeżeli możliwości techniczne realizacji linii falowodowych mają naśladować z tymi przewidywaniami, to w następnych latach należy skoncentrować się na następujących pracach badawczych:

- 1/ dalsze badania w zakresie technologii falowodów, parametrów transmisyjnych linii falowodowych oraz określenie optymalnych odległości między stacjami przekaźnikowymi;
- 2/ dalsze prowadzenie prac projektowych i konstrukcyjnych nad

urządzeniami końcowymi i przekaźnikowymi w oparciu o technologię obwodów scalonych;

- 3/ ustalenie ogólnych założeń systemowych dla umożliwienia kompatybilnej współpracy linii falowodowych z dotychczas istniejącymi analogowymi i przyszłościowymi cyfrowymi systemami telekomunikacyjnymi.

9. ZASADY PROJEKTOWANIA I BUDOWY DOŚWIADCZALNEJ LINII FALOWODOWEJ O DŁUGOŚCI 14 KM

Wstępne badania prowadzone od pewnego czasu w ZSRR i innych krajach wykazały możliwości realizacji linii falowodowych o bardzo dużych pojemnościach, odpowiadających setkom tysięcy kanałów telefonicznych. Sygnały są przesyłane w paśmie częstotliwości 35 - 100 GHz przy zastosowaniu modulacji kodowo-impulsowej za pomocą falowodu cylindrycznego, w którym rozchodzi się fala modu TE_{01} .

Należy stwierdzić, że realizacja tak dużych liczb łączy jest możliwa nie tylko przy zastosowaniu falowodów lub światłowodów, ale również poprzez budowę kilku równoległych linii kablowych lub specjalnych kabli zawierających wiele rur kabli koncentrycznych. Korzyści płynące z realizacji linii szerokopasmowych tą lub inną metodą muszą być rozpatrzone przy uwzględnieniu całego szeregu czynników technicznych i ekonomicznych, jak m.in. konieczność spełnienia zaleceń CCITT, jakość transmisji, kompatybilność z istniejącymi lub przewidzianymi do realizacji systemami łączno-

ści, niezawodność pracy, warunki eksploatacji itp. Szczególnie istotne może być przy tym założenie możliwości łatwego powiększenia przepustowości linii w przyszłości, uzyskiwanej wyłącznie poprzez rozbudowę urządzeń na stacjach końcowych i przekąźnikowych. Warunek ten jest bez trudu spełniany w liniach falowodowych na fale milimetrowe.

W ramach prac prowadzonych przez Ministerstwo Łączności Związku Radzieckiego przystąpiono ostatnio do budowy 14-kilometrowego odcinka doświadczalnej linii falowodowej, zakończenie której powinno nastąpić w 1972 roku, kiedy to przystąpi się do prób i badań.

W pierwszym okresie przewiduje się próby w pasmie częstotliwości 25-40 GHz, przy czym sygnały telewizyjne i sygnały telefonii wielokrotnej będą przesyłane przy zastosowaniu modulacji PCM. Szybkość transmisji wynosząca w okresie początkowym 114 Mbit/s zostanie następnie zwiększona do 240 i 350 Mbit/s. W jednym z kanałów radiowych systemu będzie przesyłany sygnał zbiorczy telefonii przy wykorzystaniu zasad modulacji częstotliwości, inny będzie wykorzystywany do badań, a pozostałe będą zastosowane do realizacji połączenia pomiędzy dwiema dużymi centralami tandemowymi w Moskwie, co pozwoli na zdobycie konkretnych doświadczeń w warunkach normalnej pracy tego typu linii.

Omawiana linia falowodowa składa się z odcinków falowodów cylindrycznych miedzianych pokrytych dielektrykiem oraz falowodów zwijanych we wzajemnym stosunku, pozwalającym na uzyskanie dostatecznie małego współczynnika konwersji i rekonwersji modów. Odcinki falowodów o długości 2,5 lub 5 m są łączone ze sobą w sekcje o długościach 10 m za pomocą specjalnych kolnierzy i w tej

postaci dostarczane na teren budowy. Falowody są instalowane w specjalnych łożyskach betonowych wypełnionych miękkim piaskiem i umieszczonych na dnie rowu.

Ten sposób instalacji pozwala na uzyskanie bardziej równomiernej charakterystyki częstotliwościowej przenoszenia linii i eliminuje wpływ gruntu na sztywność konstrukcji falowodowej. W punktach najbardziej zagrożonych trasy /pod strumieniami, drogami itp. / falowód jest umieszczany w rurach stalowych lub plastikowych. W miarę potrzeby wzdłuż linii są rozmieszczone specjalne elementy, jak wpusty powietrza, kompensatory zmian długości, kolanka falowodowe itp.

Prowadzone są specjalne badania mające na celu zabezpieczenie linii falowodowej przed korozją, prądami błądzącymi, zakłóceniami ze strony linii energetycznych i wylądowań atmosferycznych. Szczególnie wiele uwagi poświęca się pewności pracy połączeń oraz zbadaniu wszelkich spraw związanych z instalacją i utrzymaniem linii. Falowód został wypełniony suchym azotem oraz wyposażony w urządzenie zabezpieczające przed dopływem do wewnątrz powietrza. Urządzenia te zapobiegają również w dużym stopniu przed dostaniem się do wnętrza falowodu wód gruntowych w przypadku jego mechanicznego uszkodzenia.

Specjalnie zaprojektowany zestaw przyrządów pomiarowych pozwala na kontrolę podstawowych parametrów odcinków, sekcji i całej linii falowodowej po jej zainstalowaniu. Przeprowadzany jest również pomiar odchylenia toru falowodowego w płaszczyźnie pionowej, spowodowanych niestabilnością gruntu, co pozwala na porównanie pomierzonych wartości strat konwersji z wartościami obliczonymi. Dla umożliwienia badania części składowych linii falowodo-

wej wybudowanych zostanie na trasie dziesięć studzienek.

Instalacje linii falowodowej wykonuje przedsiębiorstwo podległe Ministerstwu Łączności, wyspecjalizowane w budowie linii kablowych. Warto przy tym zauważyć, że można było prowadzić prace również w okresie zimowym, chociaż nie jest jeszcze możliwe wyciągnięcie ostatecznych wniosków co do możliwości kontynuowania robót również w temperaturze do -20°C , jak w przypadku rurociągów naftowych.

Ze względu na niezbyt wysokie wymagania co do dokładności kładzenia linii falowodowej i zatrudnienie średnio wykwalifikowanego personelu nie można było uzyskać małej wartości współczynnika konwersji modu TE_{01} w inne mody i powstałe na skutek tego straty wynoszą od 3,5 do 4 dB/km. Wstępne badania pokazały, że zmniejszenie tych strat do około 2,5 dB/km prowadzi do znacznego wzrostu kosztów produkcji i instalacji linii falowodowej, tak że jedną z istotnych spraw będzie określenie optimum w tym względzie.

Wyniki obecnie prowadzonych prac badawczych pozwolą na określenie przyszłościowych parametrów systemów oraz najbardziej właściwych metod budowy linii falowodowych.

10. WŁAŚCIWOŚCI TRANSMISYJNE ZAKOPANEJ W ZIEMI LINII FALOWODOWEJ NA FAŁE MILIMETROWE

10.1. Wstęp

W Electrical Communication Laboratory /NTT/ w Tokio, od dłuższego już czasu prowadzone są prace nad falowodami cylindrycznymi o średnicy wewnętrznej 51 mm, przydatnymi do realizacji linii falowodowych. Są to falowody spiralne i falowody rurowe pokryte warstwą dielektryku, charakteryzujące się odpowiednio tłumiennością 1,4 i 1,5 dB/km w zakresie fal milimetrowych o częstotliwości 50 GHz. Dla przeprowadzenia prób i badań tego typu falowodów zostały w 1967 roku skonstruowane dwie doświadczalne linie falowodowe równoległe jedna do drugiej o długości 4,2 km każda, co przy połączeniu w pętlę pozwala przeprowadzać pomiary na linii falowodowej o łącznej długości 8,2 km.

10.2. Układ doświadczalnej linii falowodowej

Szkic przebiegu trasy doświadczalnej linii falowodowej przedstawiono na rys. 20. Na przeważającej długości linia falowodowa była układana wzdłuż linii prostej, a dla części zakrzywionej promień krzywizny nie był mniejszy od 30 m. Wzdłuż linii rozmieszczono pięć studzienek, dzięki czemu jest możliwość oddzielenia i mierzenia niezależnie każdej sekcji linii falowodowej pomiędzy dwiema studzienkami.

Jedną z doświadczalnych linii falowodowych składa się z odcinków falowodów różnego typu, tzn. 20-metrowe odcinki falowodów

sztynnych pokrytych dielektrykiem są przedzielone 5-metrowymi odcinkami falowodu spiralnego /falowód "mieszany"/. Druga linia została zrealizowana tylko przy zastosowaniu falowodów spiralnych. Pierwsze sekcje falowodu /Nr 0 - Nr 1/ oraz sekcje toru zakrzywionego składają się przy tym w obu przypadkach tylko z odcinków falowodu spiralnego.

Standardowa długość odcinka dowolnego rodzaju wynosi 5 m. Falowód spiralny jest umieszczony w ochronnej rurze stalowej, a falowód sztywny wykonany jest w postaci rury stalowej pomiedzowanej i pokrytej od wewnątrz warstwą polietylenu o grubości 0,3 mm.

10.3. Konstrukcja linii falowodowej

Dla połączenia odcinków falowodu stosowane są w zasadzie złącza stałe w postaci rękawa gwintowanego, jedynie w przypadkach połączeń odcinków falowodu w studzienkach zastosowano specjalne złącza rozłączalne w celu umożliwienia pomiarów i badań sekcji linii falowodowej. Złącza takie składają się z odpowiednio dopasowanych do zakończeń dwóch odcinków falowodu pierścieni oraz nagwintowanego kołnierza /rękawa/.

Gazoszczelność połączeń została zapewniona za pomocą specjalnych pierścieni z tworzywa, wsuniętych w pierścieniowe żłobki po obu stronach rękawa, oraz po wmontowaniu przez pokrycie całych złączy specjalnym klejem epoksydowym.

Na przeważającej długości trasy linia falowodowa została zakopana bezpośrednio w ziemi wzdłuż drogi jezdnej. W tym celu został wykopany odpowiedni rów, na dnie którego zostały ułożone po-

przecne podpórki. Ułożony z kolei w rowie falowód został pokryty 10 cm warstwą ochronną czystego piasku, na który narzucono wykopaną z rowu ziemię. W miejscach skrzyżowania toru linii falowodowej z drogami falowód jest umieszczony w odpowiednich rurach prowadzących.

10.4. Prostoliniowość zakopanej linii falowodowej

Prostoliniowość ta była kontrolowana w trakcie instalowania falowódów metodami mechanicznymi, a po zbudowaniu linii falowodowej na zasadzie pomiarów elektrycznych.

Pomiary mechaniczne przeprowadzane przed pokryciem falowodu ziemią polegały na odczytywaniu co 1,5 m poziomu ułożenia falowodu i określaniu na tej podstawie stopnia zakrzywienia falowodu za pomocą odpowiednich wzorów.

Elektryczny miernik prostoliniowości wykorzystywany po zainstalowaniu linii składa się ze wskaźnika i wsuwanej do falowodu puszkę z umieszczonym wewnątrz czujnikiem, który wykrywa jakąkolwiek falistość w przebiegu linii falowodowej. Puszka ta wkładana jest do falowodu w jednej ze studzienek i przeciągana do drugiej dla mierzenia prostoliniowości sekcji falowodu pomiędzy dwiema studzienkami.

Przeprowadzane pomiary wykazały, że na żadnym odcinku "prostoliniowego falowodu" promień krzywizny zakrzywienia trasy linii falowodowej nie jest mniejszy od 300 m.

10.5. Charakterystyki tłumienności linii falowodowej

Charakterystyki tłumienności zakopanych w ziemi linii falowodowych były mierzone na zasadzie odbić impulsów w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 21. Klustron na fale milimetrowe ma tak dobrane warunki pracy, że generuje tylko w momentach przyłożenia na elektrodę przyspieszającą sygnału impulsowego. Te modulowane impulsowo fale milimetrowe są doprowadzane do badanej linii falowodowej poprzez cyrkulator, układ konwersji modu itp., wprowadzane do studzienki w specjalnym opakowaniu. W najbliższej studzience falowód jest zamykany dodatkowo specjalną przesłoną, a koniec linii falowodowej zostaje zwarty. Tłumienność linii falowodowej na trasie przesłona-zwarcie-przesłona jest określana na podstawie pomiaru stosunku amplitudy impulsów odbitych od przesłony oraz zwarcia falowodu.

Tłumienność falowodu była mierzona dla częstotliwości 35, 40, 50, 60, 70, 80 i 100 GHz przy szerokościach pasm 4 lub 5 GHz. Dla przykładu na rys. 22 przedstawiono przebieg charakterystyki tłumienności dla zakresu częstotliwości 50 GHz. Tłumienność ta wynosi około 2 dB/km dla prostoliniowych sekcji falowodu i około 6 dB/km, tzn. jest o około 3 razy większa, dla zakrzywionej sekcji pomiędzy studzienkami 1 i 2, której promień krzywizny wynosi jak wiadomo 30 m.

Charakterystyki tłumienności falowodów dla zakresu częstotliwości do 100 GHz są przedstawione w tabl. 6.

Tłumienność sekcji falowodu między studzienkami od 2 do 6 jest także przedstawiona na rys. 23. Linia ciągła wskazuje tłumienność

Tablica 6

Sekcje między studzienkami	35 GHz	40 GHz	50 GHz	60 GHz	80 GHz	100 GHz
Falowód mieszany	1 - 2	2,43 dB	-	3,24 dB	7,73 dB	16,73 dB
	2 - 6	21,23 dB	18,40 dB	15,62 dB	17,38 dB	27,10 dB
	1 - 2	2,22 dB	-	2,82 dB	7,33 dB	16,39 dB
Falowód spiralny	2 - 6	21,24 dB	18,34 dB	16,59 dB	18,51 dB	27,75 dB

na jednostkę długości linii falowodowej "mieszanej", złożonej z odcinków falowodów spiralnych i falowodów pokrytych dielektrykiem, obliczoną na podstawie pomiarów prostoliniowości falowodów przy następujących warunkach połączeń odcinków falowodów: przesunięcie osi około 0,05 mm, kąt odchylenia 1,4 miliradiana dla odległości 5-metrowych. Linia przerywana wskazuje tłumienność na jednostkę długości linii falowodowej "mieszanej" zainstalowanej dokładnie wzdłuż linii prostej ponad powierzchnią gruntu. Różnica wartości tłumienności dla obu przypadków wynika z faktu zakopania falowodu. Z pomiarów tych można wyciągnąć wniosek, że w zakresie częstotliwości 40 do 80 GHz tłumienność nie przekracza 2,5 dB/km, w związku z czym ten zakres częstotliwości wydaje się najbardziej właściwy dla rozpatrywanego typu linii falowodowej. Zakres ten może ulec rozszerzeniu dopiero po opracowaniu doskonalszych metod instalowania falowodu.

Na rysunku 24 przedstawiono zmiany tłumienności falowodu w ciągu dwóch lat od momentu zainstalowania linii. Choć linia falowodowa została w zasadzie zakopana bez specjalnej ochrony i podlega ciśnieniu nałożonej warstwy ziemi, zmiany te są bardzo małe i nie przekraczają $\pm 3\%$.

10.6. Charakterystyka opóźnienia czasowego linii falowodowej

W celu umożliwienia pomiarów opóźnienia dla zakresu częstotliwości 50 GHz został opracowany specjalny zestaw przyrządów pomiarowych, pracujący na zasadzie modulacji częstotliwości fali nośnej.

Charakterystyki opóźnień czasowych przedstawione są na rys. 25.

Dwie krzywe obrazują odpowiednio przebieg opóźnienia czasowego linii falowodowej o długości 4,75 km, powstałej przez połączenie dwóch równoległe przebiegających linii w studziencie Nr 4 oraz opóźnienia czasowego zestawu przyrządów pomiarowych, tak że dopiero różnica między wartościami obu krzywych odpowiada rzeczywistemu opóźnieniu czasowemu wprowadzanemu przez samą linię falowodową. Średnio opóźnienie to wynosi zgodnie z przewidywaniami około 3 nsek/500 MHz.

Wyniki pomiarów wskazują, że główną przyczyną opóźnienia czasowego są właściwości rozproszeniowe falowodu, natomiast wpływ konwersji i rekonwersji modów jest w tym względzie bardzo mały.

10.7. Właściwości transmisyjne dla impulsów nanosekundowych

Przeprowadzane w tym zakresie pomiary polegały na przesyłaniu przez linię falowodową fal milimetrowych modulowanych w amplitudzie impulsami nanosekundowymi. Fale te były wytwarzane na zasadzie powielania częstotliwości.

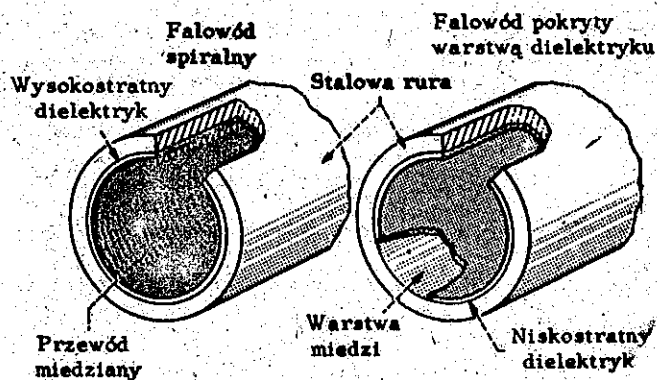
Odbierany na falach milimetrowych sygnał ulegał na wstępie przemianie do częstotliwości pośredniej 4 GHz za pomocą generatora lokalnego o częstotliwości większej od częstotliwości sygnału odbieranego, tak że otrzymuje się widmo sygnału częstotliwości pośredniej odwrócone w stosunku do widma fali odbieranej. Sygnał o częstotliwości 4 GHz jest następnie przesyłany przez odpowiedniej długości falowód prostokątny w celu usunięcia niekształceń wprowadzanych na skutek właściwości rozpraszających falowodu cylindrycznego.

Na rysunku 26 pokazano wyniki pomiarów przeprowadzonych przy

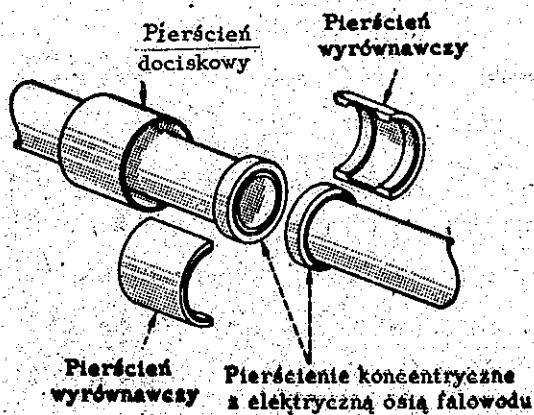
przesyłaniu impulsów o szerokości 2,5 ns, z których wynika, że zniekształcenia impulsu powstałe na skutek właściwości rozpraszających falowodu są zupełnie skompensowane. Minimalna wartość wykrywanego sygnału echa została ograniczona szumami własnymi urządzeń i wynosiła około -34 dB w stosunku do wartości szczytowej odbieranego sygnału przy uwzględnieniu tłumienności falowodu 20 dB, a ponieważ brak na oscyloskopie sygnałów echa oznacza to, że w linii falowodowej nie występują sygnały odbite o poziomie wyższym od -34 dB.

10.8. Wnioski

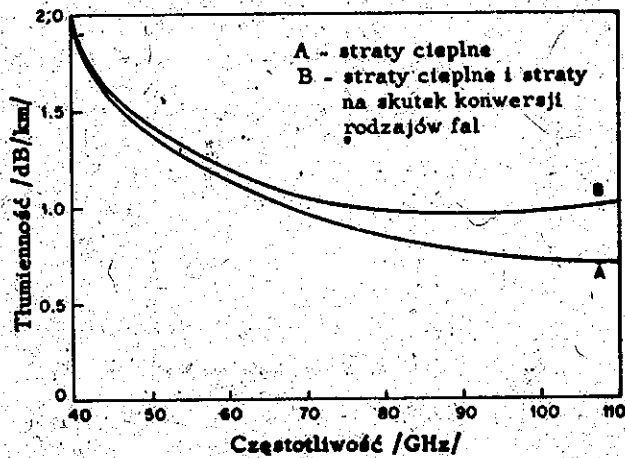
Zbudowanie linii doświadczalnej pozwoliło na przeprowadzenie wielu pomiarów i badań dotyczących sposobów instalowania i warunków pracy linii falowodowej. Między innymi stwierdzono, że tłumienność linii jest mniejsza od 2,5 dB/km dla zakresu częstotliwości 40 - 80 GHz, przy czym o około 0,4 dB/km większa w stosunku do tego samego typu falowodów zainstalowanych w warunkach laboratoryjnych przy zachowaniu idealnej prostoliniowości toru. Należy podkreślić, że w trakcie przeprowadzania pomiarów nie stwierdzono zniekształceń fali modulowanej impulsami nanosekundowymi na skutek konwersji i rekonwersji modów pożądaných na niepożądane i odwrotnie.



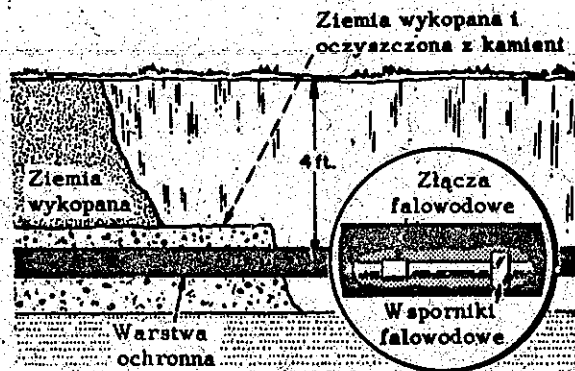
Rys. 1. Typy falowodów



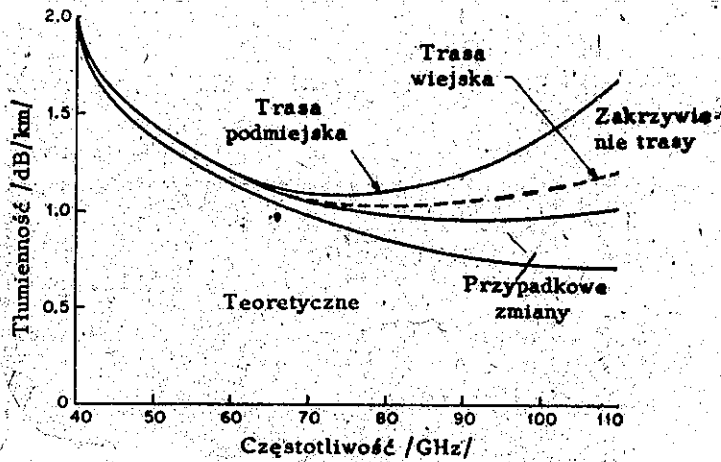
Rys. 2. Proponowany sposób wykonania złączy falowodowych



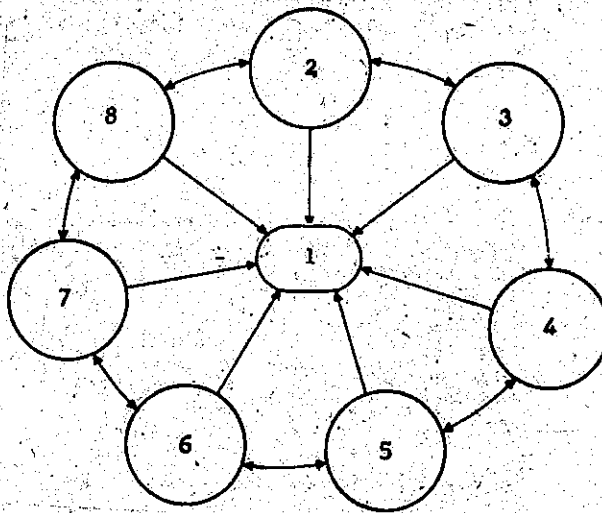
Rys. 3. Przewidywana tłumienność produkowanych falowodów spiralnych i metalowych pokrytych warstwą dielektryku o średnicach 51 mm



Rys. 4. Układanie linii falowodowej

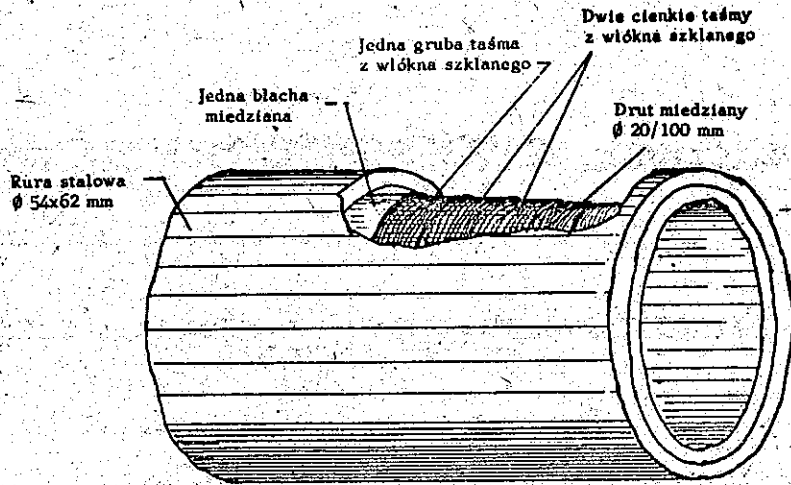


Rys. 5. Tłumienności składowe instalowanego falowodu

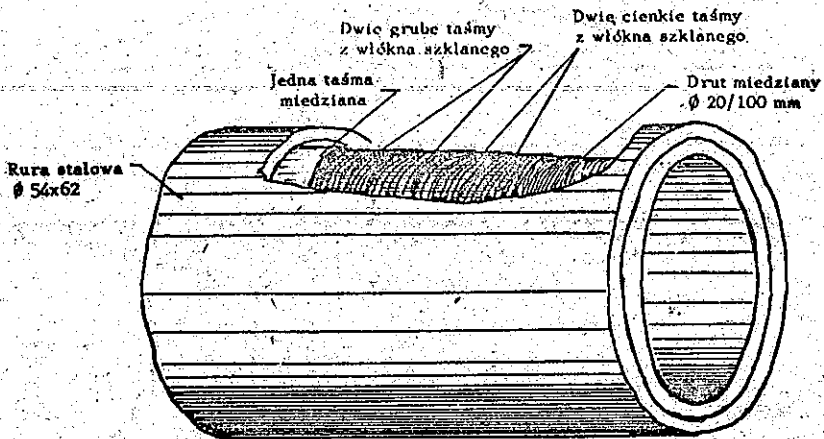


Rys. 6. Czynniki, które należy uwzględnić przy projektowaniu:

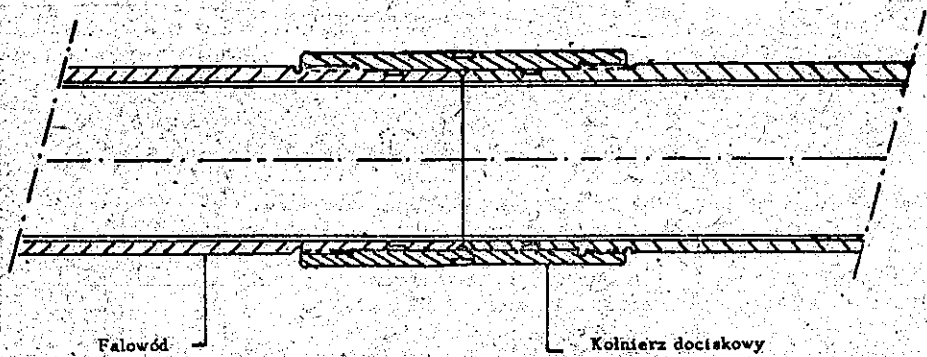
1 - optymalna trasa linii falowodowej; 2 - wymagana przepustowość; 3 - korzyści i straty płynące z wyboru niewłaściwego sposobu; 4 - koszty budowy; 5 - główne przeszkody; 6 - sprawy związane z utrzymaniem; 7 - odstęp między stacjami przekaźnikowymi; 8 - straty powstałe na skutek zakrzywień toru falowodu



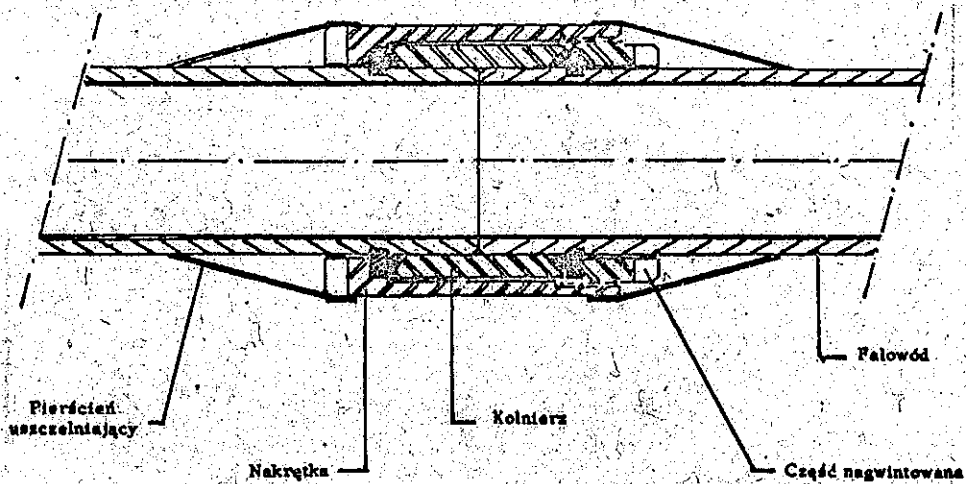
Rys. 7. Falowód pokryty warstwą absorpcyjną



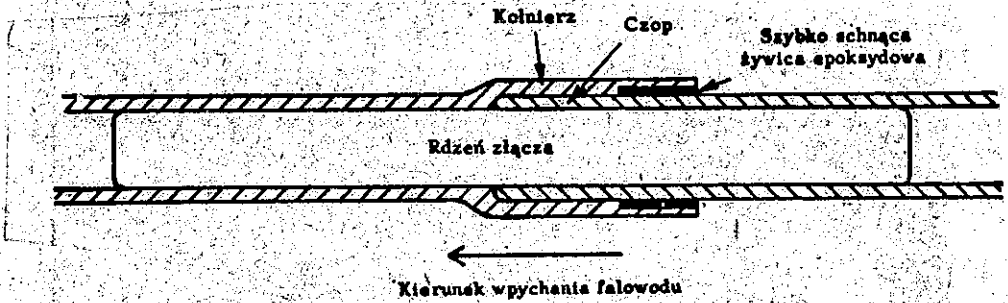
Rys. 8. Falowód z taśmą odbijającą



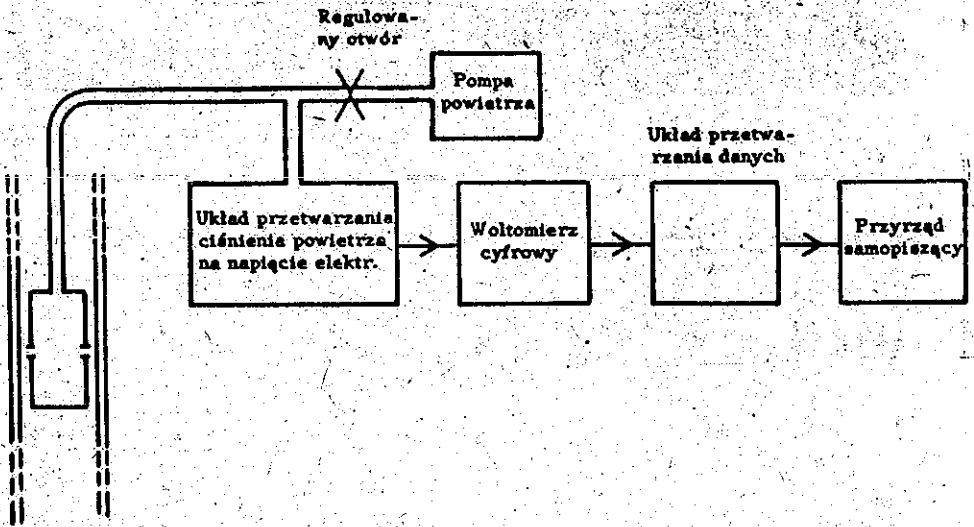
Rys. 9. Kolnierze /pierścienie/ dociskowe do falowodu cylindrycznego



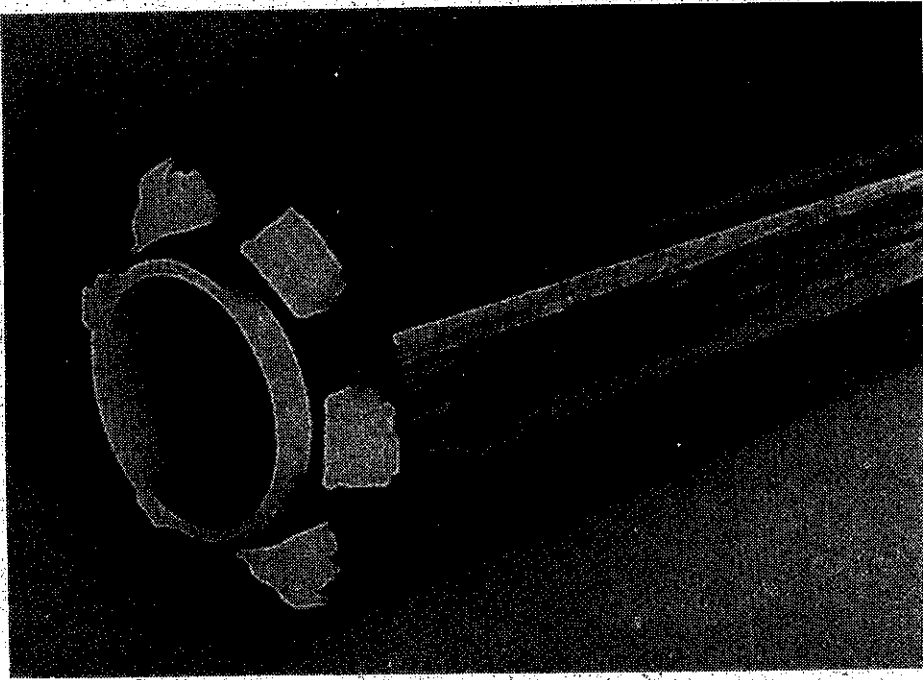
Rys. 10. Kolnierze /pierścienie/ rozłączalne do falowodu cylindrycznego



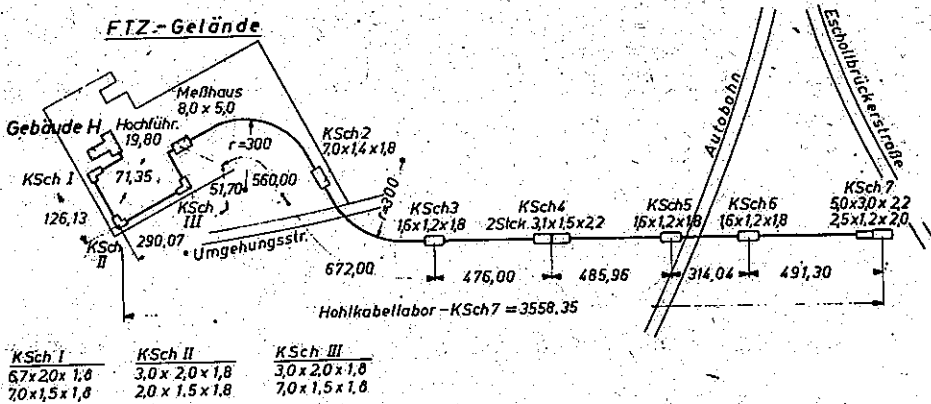
Rys. 11. Konstrukcja złącza



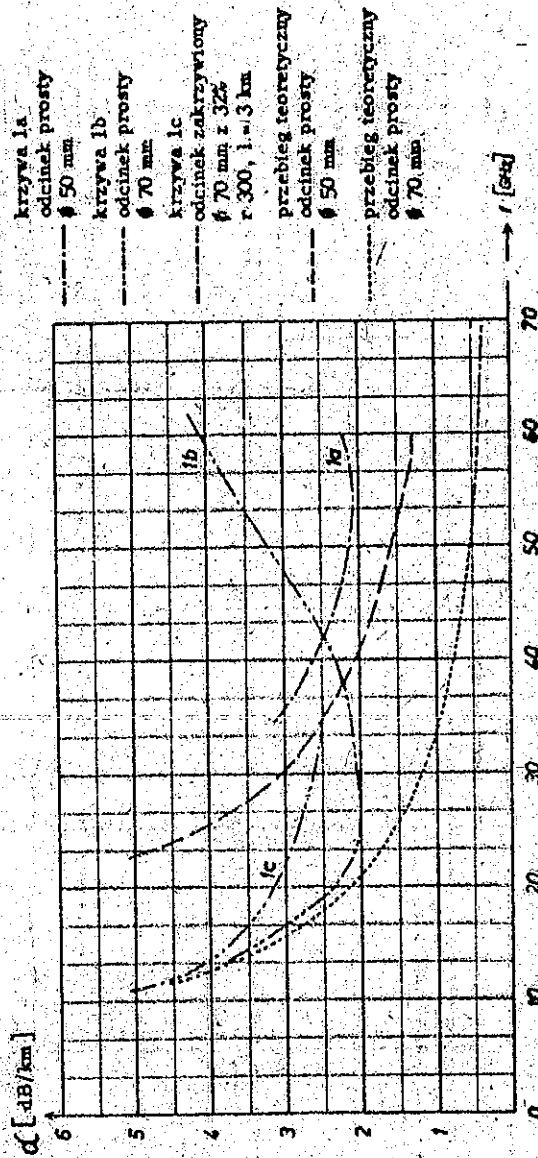
Rys. 12. Metoda pomiaru zmian poprzecznych wymiarów falowodu



Rys. 13. Falowód z plastikowymi pierścieniami i rolkami umieszczony w rurze PVC



Rys. 14. 3 x 3 falowodowa linia doświadczalna koło Darmstadt



Rys. 15. Ilumienność falowodu pokrytego warstwą dielektryku

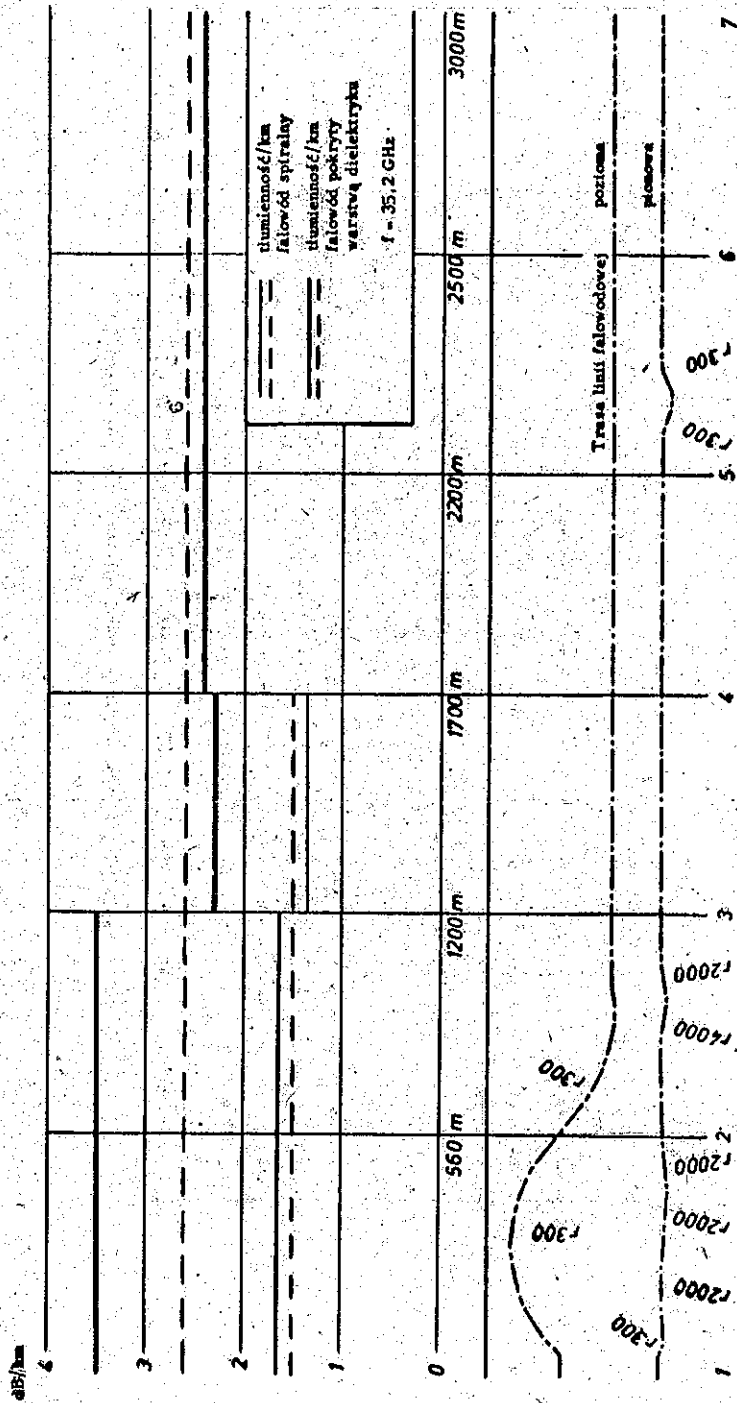
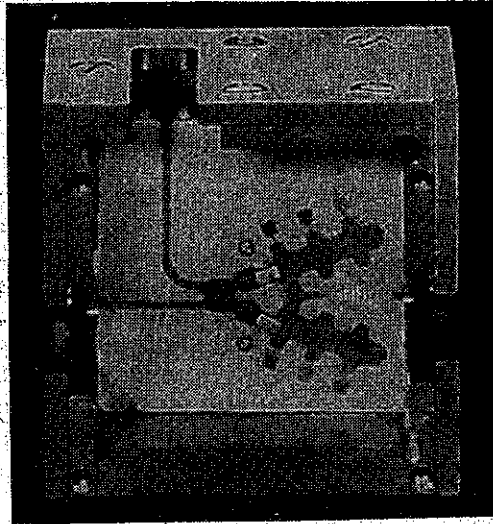
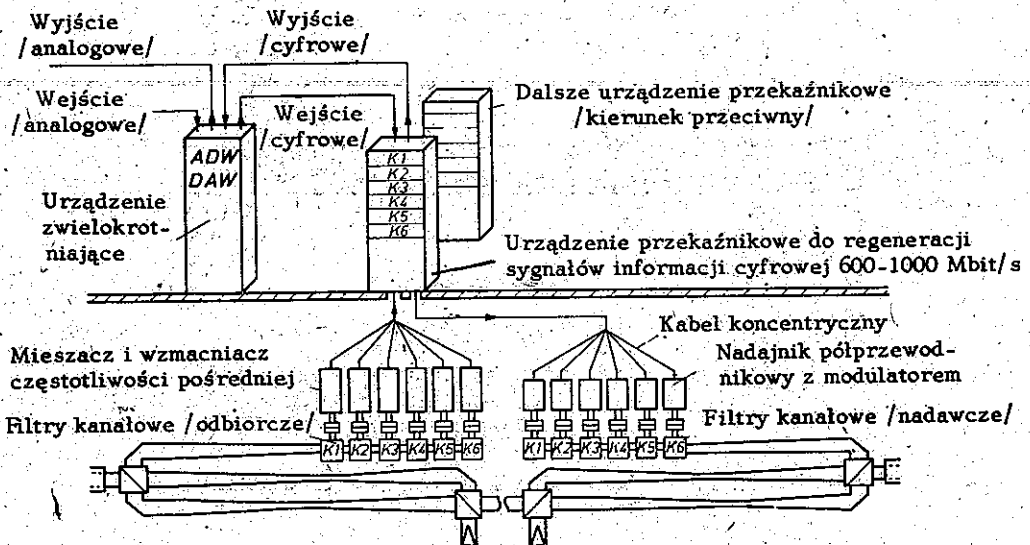


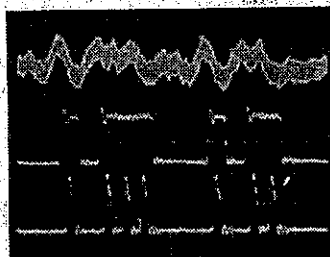
Fig. 16. Charakterystyki tłumienności falowodu spiralnego i falowodu pokrytego warstwą dielektryku zastosowanych na linii doświadczalnej



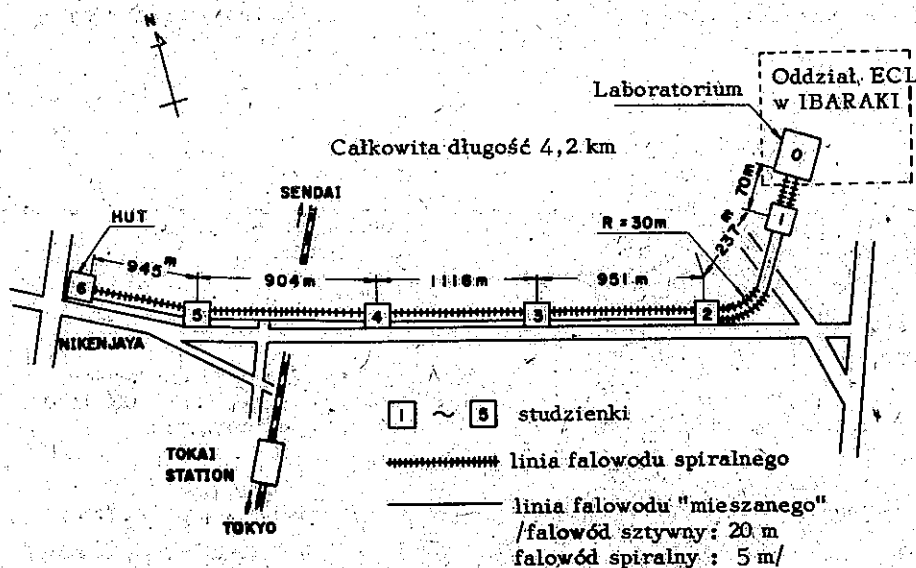
Rys. 17. Mieszacz częstotliwości na pasmo P zrealizowany w technice linii paskowych



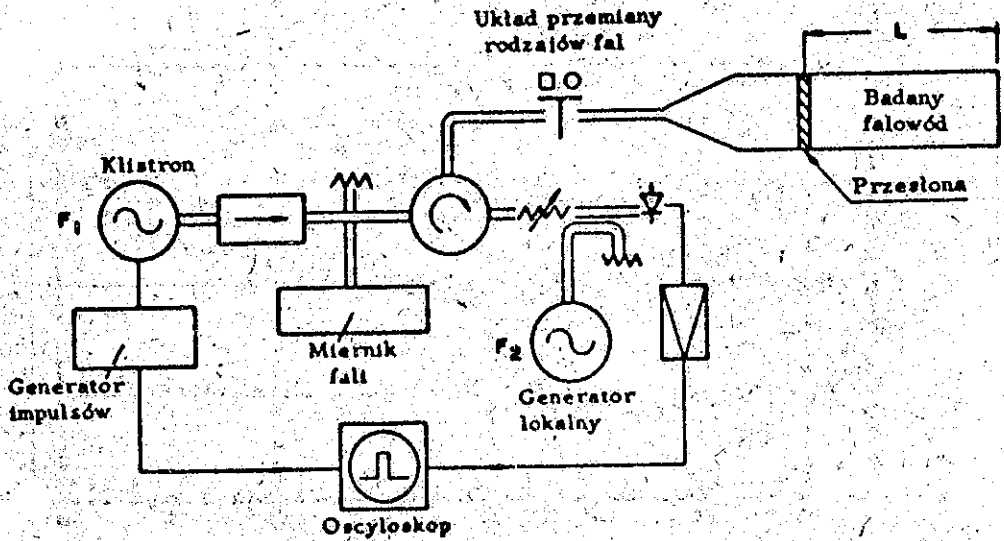
Rys. 18. Układ urządzeń przekaźnikowych



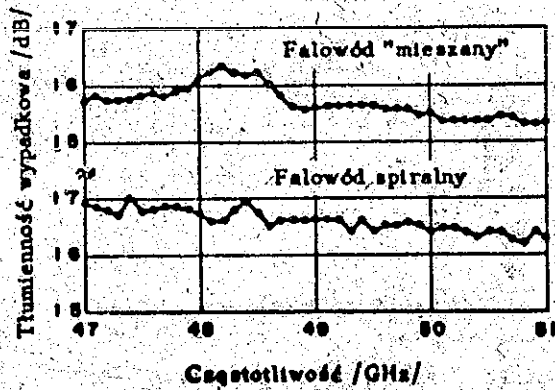
Rys. 19. Przesyłanie sygnałów cyfrowych 80 Mbod na częstotliwości 17 GHz przez linię falowodową o długości 6 km /u góry: impulsy na końcu falowodu /wejście regeneratora/ w środku: impulsy na wyjściu regeneratora, NRZ; u dołu: impulsy na wyjściu regeneratora, RZ/



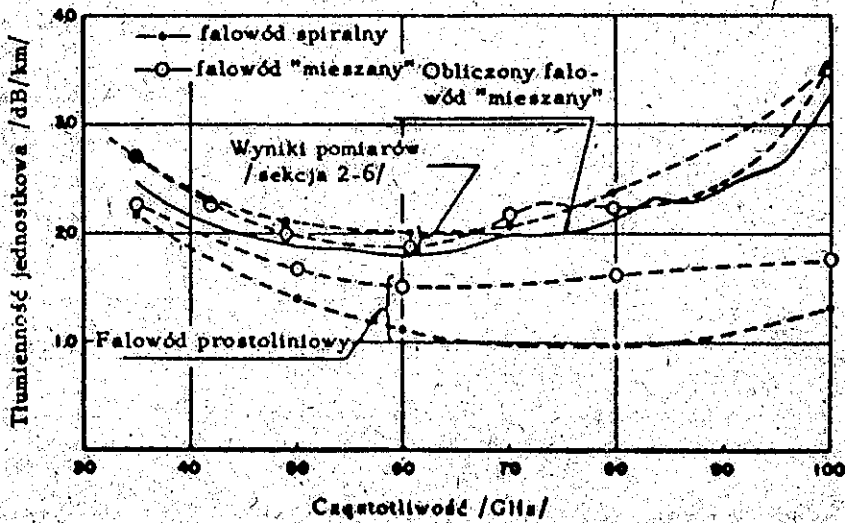
Rys. 20. Trasa przebiegu i sposób zainstalowania linii falowodowej.



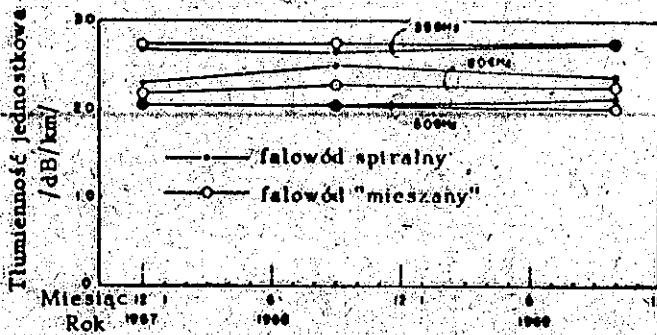
Rys. 21. Schemat blokowy zestawu urządzeń do pomiaru tłumienności



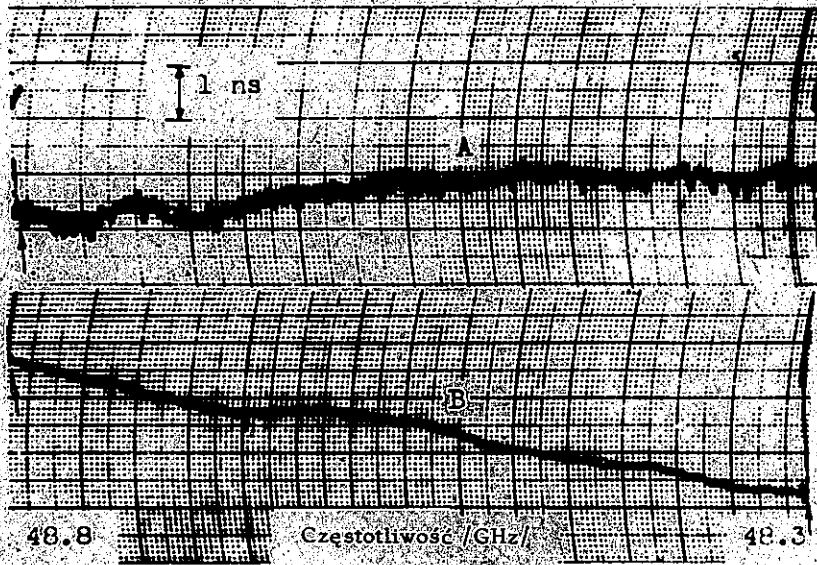
Rys. 22. Charakterystyki tłumienności sekcji falowodu pomiędzy studzienkami 2-6



Rys. 23. Charakterystyki tłumienności linii falowodowej w funkcji częstotliwości

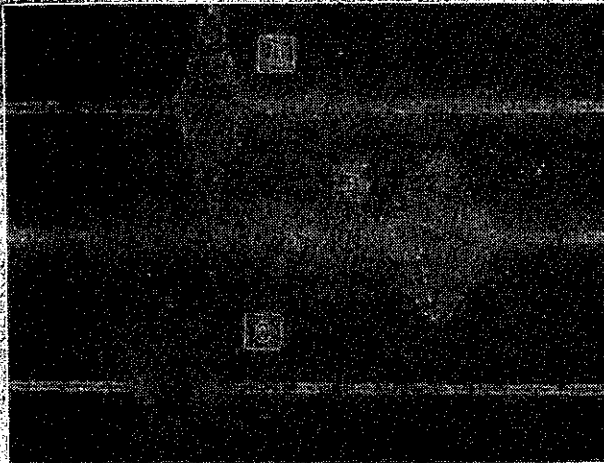


Rys. 24. Zmiana tłumienności jednostkowej linii /sekcja 2-6/ w funkcji czasu



Rys. 25. Charakterystyki opóźnienia czasowego linii falowodowej o długości 4,75 km

A - wypadkowa charakterystyka opóźnienia czasowego; B - charakterystyka opóźnienia czasowego zestawu przyrządów pomiarowych



Rys. 26. Kształty nanosekundowych impulsów fali nośnej /długość linii falowodowej 8,4 km/

A - kształt sygnału nadawanego; B - kształt sygnału odbieranego bez kompensacji; C - kształt sygnału odbieranego po kompensacji

